



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FI DE CARRERA

TÍTOL: Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan.

AUTOR: Cristian García Ramos.

TITULACIÓ: Ingeniería Técnica Industrial.

DIRECTOR: Sergi Menargues Muñoz.

DEPARTAMENT: Ciencia de los materiales y ingeniería metalúrgica.

DATA: Julio 2008

TÍTOL: Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan.

COGNOMS: García Ramos

NOM: Cristian

TITULACIÓ: Ingeniería Técnica Industrial

ESPECIALITAT: Mecánica

PLA: 95

DIRECTOR: Sergi Menargues Muñoz

DEPARTAMENT: Ciencia de los materiales y ingeniería metalúrgica

QUALIFICACIÓ DEL PFC

TRIBUNAL

PRESIDENT

SECRETARI

VOCAL

DATA DE LECTURA:

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: ☒ Sí ☐ No

PROJECTE FI DE CARRERA

RESUM (màxim 50 línies)

En este proyecto se simula el proceso de inyección a alta presión de la pletina de una motocicleta, mediante los programas comerciales de elementos finitos ProCAST y Vulcan.

El proceso simulado está formado por una máquina de inyección THT presses de la que destaca que es de cámara fría y de inyección vertical, hecho que hay que tener en cuenta a la hora de realizar la simulación con ambos programas.

Para realizar la simulación con ambos programas y con la finalidad de hacer una comparación óptima entre ambos, se han utilizado las mismas condiciones de contorno.

Se estudia el efecto de los parámetros: temperatura de colada, temperatura de molde y velocidad de inyección.

Se han realizado un total de doce simulaciones con ProCAST, a las que se les ha modificado los parámetros antes anunciados, con el fin de averiguar cómo afectan a la defectología de la pletina, con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas de inyección.

Una vez averiguadas las condiciones de contorno con las que se obtienen las inyecciones óptimas, se ha realizado la simulación con Vulcan.

Finalmente se ha realizado una comparación con ProCAST y Vulcan, con el fin de averiguar qué margen de discrepancia hay entre parámetros iguales, calculados por distintos programas.

Paraules clau (màxim 10)

Inyección	Simulación	Análisis	ProCAST
Vulcan	Molde	Aleación	Turbulencia
Temperatura	Defectología		

Índice

1. Introducción	11
1.1. Objetivos	11
1.2. Justificación	11
1.3. Resumen	12
2. Procesos de conformado por inyección	14
2.1. Máquinas de cámara caliente	15
2.1.1. Inyección por pistón	15
2.1.2. Inyección por aire comprimido	16
2.2. Máquinas de cámara fría	16
2.2.1. Máquinas de inyección horizontal	17
2.2.2. Máquinas de inyección vertical	17
3. El aluminio	19
3.1. Características físicas	21
3.2. Características mecánicas	21
3.3. Características químicas	21
3.4. Aplicaciones	22
3.5. Aleaciones de aluminio	22
3.6. Aportaciones de los elementos aleantes	23
3.7. Clasificación de las aleaciones utilizadas en la fundición	24
3.8. Aleación L-2630	24

4. El molde	27
4.1. Material del molde	27
4.1.1. Acero H13	27
4.1.2. Características del acero H13	28
4.2. Partes del molde	30
4.3. Sistema de alimentación	31
4.3.1. Ataques	31
4.3.2. Respiraderos	31
4.3.3. Mazarotas	32
5. Tipos de flujo	33
5.1. Flujo laminar	33
5.2. Flujo turbulento	34
5.3. Número de Reynolds	35
6. Defectología	38
6.1. Contracción mayor de la prevista	38
6.1.1. Rechupes	38
6.1.2. Tensiones internas. Grietas y deformaciones	42
6.2. Defectos debidos a los gases	44
6.2.1. Sopladuras, porosidad y ampollas	44
6.3. Inclusiones	45
6.4. Segregaciones	46

6.5. Defectos debidos a la colabilidad	46
6.6. Defectos debidos a la aleación fría	46
6.7. Clasificación de los defectos de fundición	47
6.8. Inspección de las piezas fundidas	47
7. Simulación asistida por ordenador	49
7.1. Método de elementos finitos (MEF)	50
7.2. Programa ProCAST	50
7.2.1. Módulos de ProCAST	51
7.3. Programa Vulcan	52
7.3.1. Aspectos específicos de Vulcan	53
8. Simulación con ProCAST y Vulcan	55
8.1. Simulación con ProCAST	55
8.1.1. Parámetros de entrada	55
8.1.2. Simulaciones	58
8.1.2.1. Simulación 1	58
8.1.2.2. Simulación 2	61
8.1.2.3. Simulación 3	64
8.1.2.4. Simulación 4	67
8.1.2.5. Simulación 5	70
8.1.2.6. Simulación 6	73
8.1.2.7. Simulación 7	76

8.1.2.8. Simulación 8	79
8.1.2.9. Simulación 9	82
8.1.2.10. Simulación 10	85
8.1.2.11. Simulación 11	88
8.1.2.12. Simulación 12	91
8.1.3. Discusión de resultados	94
8.2. Simulación con Vulcan	97
8.2.1. Parámetros de entrada	97
8.2.2. Simulación	98
9. Análisis comparativo entre ProCAST y Vulcan	101
9.1. Análisis 1	102
9.2. Análisis 2	104
9.3. Análisis 3	106
9.4. Análisis 4	108
9.5. Discusión de resultados	110
10. Conclusiones	112
11. Presupuesto	113
12. Bibliografía	115
13. Anexos	117

1. Introducción

1.1. Objetivos

Los objetivos propuestos por el Departamento de ciencia de los materiales y ingeniería metalúrgica, para llevar a cabo la realización de este proyecto, se exponen a continuación:

- Realizar la simulación del llenado de un molde por fundición a alta presión.
- Optimizar los parámetros de inyección.
- Aprender a utilizar los programas comerciales ProCAST y Vulcan.
- Averiguar qué margen de discrepancia hay entre parámetros iguales calculados por ambos programas.
- Ampliar el conocimiento sobre la fundición a alta presión y todo su entorno (máquinas inyectoras, moldes, aleaciones, etc.).

1.2. Justificación

Este proyecto fue propuesto por el Departamento de ciencia de los materiales y ingeniería metalúrgica de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova y la Geltrú, con el fin de realizar la simulación del proceso de inyección a alta presión de una pletina, mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan, con el fin de averiguar la discrepancia que presentan los resultados obtenidos con ambos programas, para los mismos parámetros de inyección.

Anteriormente ya se habían realizado otros proyectos de simulación de inyección a alta presión, utilizando ProCAST, con lo cual la ejecución de este proyecto debía tener otras finalidades, que no meramente la simulación con ProCAST.

Este proyecto simula el mismo proceso dos veces, primero con ProCAST y una vez se han encontrado las condiciones óptimas de inyección, se ha vuelto a simular el proceso con Vulcan.

Otro de los motivos propuestos para la realización de este proyecto, es el de realizar la simulación con Vulcan, ya que este es un programa relativamente nuevo en el sector, se pretende investigar sobre el, con el fin de conocerlo un poco más. Ya que su utilidad es la misma que ProCAST, simular procesos de inyección y solidificación, se pretende averiguar si son semejantes en funcionamiento y manejabilidad.

1.3. Resumen

En este proyecto se plantea la simulación del proceso de inyección a alta presión de la pletina de una motocicleta (Figura 1.1), mediante los programas comerciales de simulación ProCAST y Vulcan, basados en la técnica de los elementos finitos.

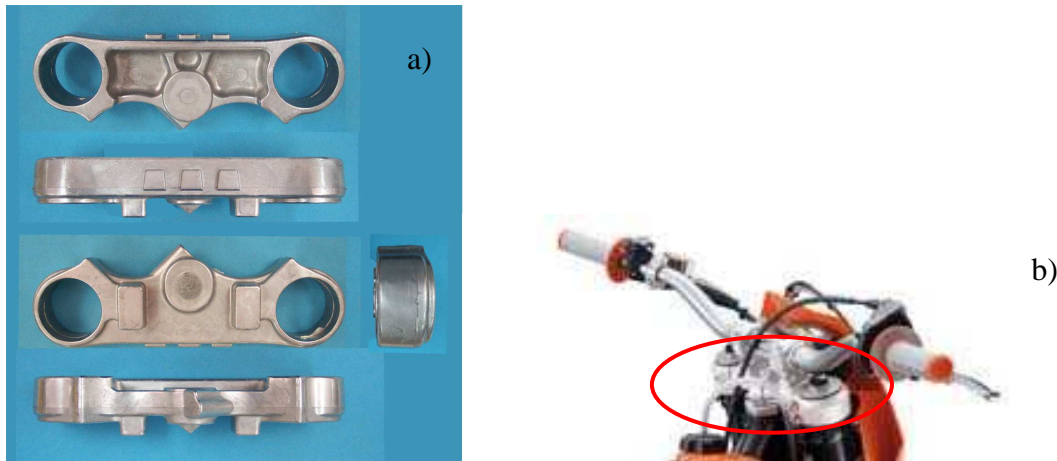


Figura 1.1 a) Componente pletina de motocicleta. b) Localización del componente.

La máquina de inyección utilizada es una THT de 400 Tn (Figura 1.2), de la que cabe destacar que es de cámara fría y de inyección vertical, hecho que hay tener en cuenta a la hora de introducir los parámetros de cálculo tanto en ProCAST como con Vulcan.



Figura 1.2 Máquina inyección THT Presses de 400 Tn.

Para realizar la simulación con ambos programas y con el fin de hacer una comparación óptima entre ambos, se han utilizado las mismas condiciones de contorno.

Se estudia el efecto de los parámetros: temperatura de colada, temperatura de molde y velocidad de inyección.

Se han realizado un total de doce simulaciones con ProCAST, dentro de las cuales se han modificado ordenadamente los parámetros antes enumerados, con el fin de averiguar cómo afectan en la defectología de la pieza y en el conformado de componentes, con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas de inyección.

Una vez obtenidos los resultados con ProCAST y las condiciones de contorno con las que se obtienen las inyecciones más óptimas, se ha efectuado la simulación con Vulcan.

Finalmente se ha realizado una comparación con ProCAST y Vulcan, con el fin de averiguar que margen de discrepancia hay entre parámetros iguales calculados por distintos programas.

2. Procesos de conformado por inyección

Este tipo de procesos se utiliza especialmente para la producción de grandes cantidades de piezas que deben reunir un alto grado de precisión, consiguiéndose una mayor exactitud cuánto más bajo es el punto de fusión de la aleación empleada.

El moldeo por inyección se caracteriza por la gran precisión dimensional, el excelente acabado superficial de las piezas (superficies limpias y lisas), por la alta productividad del proceso (gran número de piezas realizadas por unidad de tiempo y por operario), por la posibilidad de fundir piezas con paredes muy finas y agujeros de medidas muy exactas y por la gran variedad de aleaciones que pueden emplearse en este tipo de moldeo. Sin embargo, la maquinaria necesaria (máquinas inyectoras y hornos) es muy cara, y el coste del molde para cada pieza es muy elevado, con lo que este proceso sólo se justifica para la fabricación de grandes series, con el fin de amortizar el coste de todo el proceso [1] [2].

En este tipo de moldeo, el metal en estado líquido o pastoso, se introduce en el hueco del molde bajo presión, lo cual favorece un llenado rápido del molde y prácticamente asegura la eliminación de la porosidad en las secciones macizas de la pieza.

La presión debe ser en proporción más elevada cuanto mayor es la tendencia de la aleación a presentar sopladuras: en la práctica oscila entre 1 y 50MPa.

Las piezas, después de eliminar el bebedero y las mazarotas, quedan prácticamente terminadas y no necesitan un mecanizado posterior.

La estructura del metal a causa de un enfriamiento rápido, es de grano fino, y aunque a veces existen en el interior de las paredes de la pieza pequeños poros, éstos no afectan las propiedades mecánicas de las piezas coladas [3].

La presión se ejerce sobre el metal con máquinas especiales, que trabajan de forma automática o semiautomática y realizan las siguientes operaciones:

- Cierran el molde y colocan los machos en posición.
- Inyectan el metal con la presión necesaria.
- Abren el molde y extraen los machos y las piezas una vez fundidas.

El metal o la aleación fundida pueden inyectarse según sea la máquina de cámara caliente o bien de cámara fría [4].

2.1. Máquinas de cámara caliente

Las máquinas de cámara caliente se usan para inyectar aleaciones de plomo, estaño o cinc, con temperaturas de fusión de hasta 450°C y excepcionalmente para las de aluminio y magnesio. Constan de un horno de fusión, que forma parte de la máquina y transfiere automáticamente la aleación líquida a un recipiente de fundición (Figura 2.1), donde se mantiene constante el nivel y la temperatura. El llenado de la cavidad del molde se efectúa por medio de un mecanismo inyector, que está total o parcialmente sumergido en el metal líquido y lo inyecta a presión, con aire comprimido o mediante un pistón [3].

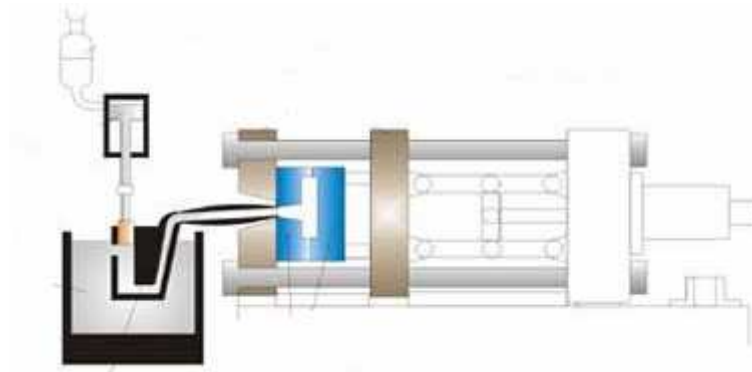


Figura 2.1 Esquema del proceso de inyección con cámara caliente [2].

2.1.1. Inyección por pistón

En las máquinas de émbolo pistón con cámara caliente (Figura 2.1), la cámara de presión está formada por un cilindro, dispuesto generalmente de forma vertical, en el cual el pistón efectúa un movimiento de vaivén. El cilindro y el pistón están colocados dentro del crisol, de modo que el primero está rodeado de metal en estado de fusión. Al subir el pistón, el metal líquido entra por gravedad en el cilindro por los orificios de entrada. Cuando el pistón baja, se cierran los orificios de entrada y el metal es introducido en el molde mediante presión mecánica transmitida por el pistón. Una vez efectuada la inyección, el pistón retrocede, y cualquier exceso de metal vuelve al fondo de la cámara de presión. Una vez que el pistón ha recorrido cierta posición en su carrera de retorno a la posición inicial, penetra nuevo metal por los orificios de entrada, quedando la máquina lista para la operación siguiente. Los orificios de entrada están ubicados lo más cerca posible del fondo del recipiente, con objeto de evitar la entrada de impurezas en la cámara de presión, en el cilindro [1].

2.1.2. Inyección por aire comprimido

Las máquinas de inyección por aire comprimido de cámara caliente, se usan para inyectar las aleaciones de aluminio y magnesio.

La construcción de la máquina puede ser tal, que la inyección se efectúe horizontalmente, verticalmente o de manera inclinada, aunque por lo general, se adopta la inyección horizontal.

El funcionamiento de estas máquinas es bastante semblante al de las de inyección por pistón. El metal en estado líquido es impulsado hacia el molde por medio de aire comprimido, o, en casos especiales, por medio de un gas a presión, a presiones comprendidas entre 1 y 10 MPa. La cámara de presión en la cual entra el aire comprimido está sostenida sobre el baño del metal líquido. Este último se encuentra en un recipiente de hierro fundido (crisol) y es calentado continuamente durante el proceso de fundición.

La cámara de presión se llena automáticamente después de cada inyección, sumergiendo la embocadura bajo la superficie del baño metálico, con lo cual no es necesario verter el metal líquido en la misma.

El inconveniente que poseen estas máquinas, es que al producirse la inyección por aire comprimido, elevan el contenido de gases de la aleación y, con ello, la porosidad de las piezas. Además se forma óxido de hierro en el interior de la cámara de compresión, que contamina la aleación, lo cual nos impide obtener piezas sanas. Por todo ello estas máquinas han sido desplazadas por las de cámara fría [1] [3].

2.2. Máquinas de cámara fría

Se denominan así porque el mecanismo de inyección se encuentra a una temperatura inferior a la de la colada de la aleación y su contacto con ella es casi instantáneo, ya que se funde en un horno aparte y se inyecta en la cámara de compresión con una cuchara o mediante un dispositivo automático de alimentación, que introduce sólo la cantidad de aleación necesaria para cada pieza. Entonces actúa un pistón, accionado por presión hidráulica y la inyecta en el hueco del molde. En la mayoría de estas máquinas la cámara de compresión es horizontal (Figura 2.2). Sin embargo existen otras modificaciones, entre las que destaca la máquina tipo Polak, con cámara de compresión vertical, cuyo funcionamiento vemos en la figura 2.3.

Este tipo de máquinas se emplea para colar piezas con aleaciones a base de cobre, aluminio, magnesio e, incluso, las de cinc, ya que la contaminación se reduce al mínimo, por el poco tiempo que la aleación está en contacto con las diversas partes de la máquina [3].

2.2.1. Máquinas de inyección horizontal

A continuación siguiendo la figura 2.2, se explica el funcionamiento de esta variedad de máquina de cámara fría.

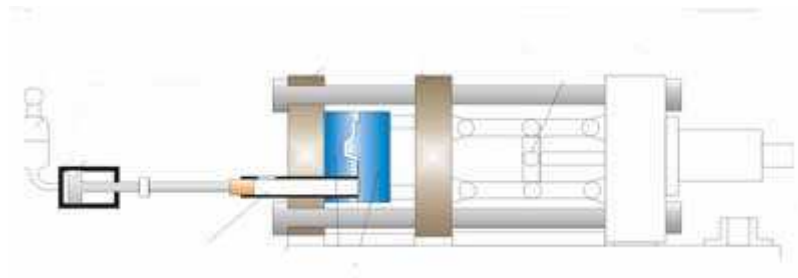


Figura 2.2 Imagen del funcionamiento de una máquina de cámara fría de inyección horizontal [2].

Primero, mediante una cuchara, se vierte el metal fundido a través del orificio de admisión en el interior del cilindro de inyección, tomándolo de un recipiente en el cual éste se mantiene en estado líquido o semilíquido. Después entra en funcionamiento el pistón, que es accionado por un cilindro hidráulico. El pistón avanza cerrando el orificio de admisión e inyectando el metal en el molde. El metal llena todas las cavidades y el pistón queda en su posición avanzada, manteniendo la presión hasta la solidificación completa del metal. Finalmente, se abren las dos mitades de la matriz; el pistón continúa ejerciendo presión sobre el tapón formado por el material sobrante y los pernos eyectores expulsan la pieza, acto seguido el pistón vuelve a su posición inicial dejando libre el orificio de admisión [1].

2.2.2. Máquinas de inyección vertical

Esta es el tipo de máquina escogida para realizar nuestra simulación (THT de 400 Tn), su funcionamiento es similar a las de inyección horizontal, pero con la peculiaridad de que en estas, como su nombre indica, la cámara de compresión al igual que todo el mecanismo de inyección está dispuesta en posición vertical tal y como podemos observar en la figura 2.3.

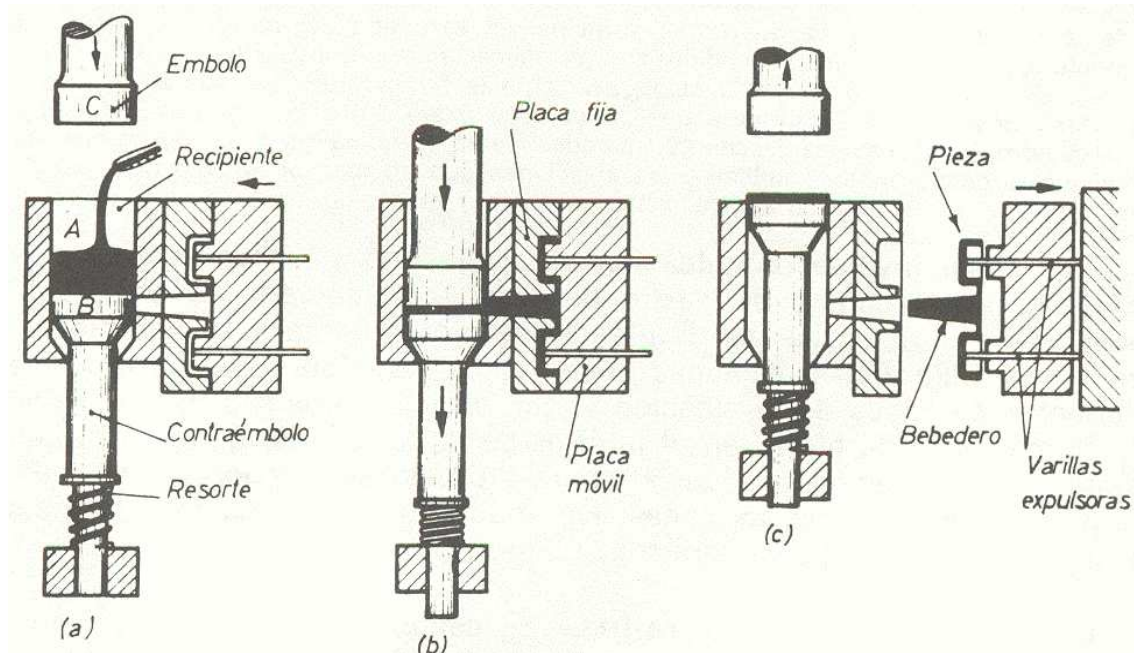


Figura 2.3 Imagen del funcionamiento de una máquina de cámara fría de inyección vertical [3].

En el instante inicial (Figura 2.3.a), el pistón inferior B tapa la boquilla de la matriz. Mientras que el pistón de trabajo C se encuentra en su posición superior; se vierte en la cámara de presión A, dispuesta como cilindro vertical, el metal tomándolo de un recipiente.

El pistón de trabajo C accionado hidráulicamente, se mueve hacia abajo con una velocidad determinada regulable (velocidad de inyección); al entrar el pistón en contacto con el metal, el pistón inferior B se empieza a mover también hacia abajo, destapando la boquilla de la matriz. El pistón de trabajo C sigue su carrera hasta que el metal llena completamente las cavidades de la matriz incluso el embudo y los canales de colada, quedando una porción del metal en la cámara (Figura 2.3.b).

A continuación, tanto el pistón de trabajo C, como el pistón inferior B ascienden para poder separar el material solidificado que se encuentra en la boquilla de la matriz y en el embudo de colada, al mismo instante que se abre la matriz para poder expulsar la pieza, mediante las varillas expulsoras (Figura 2.3.c).

Finalmente después de realizarse estos tres pasos, el pistón inferior B vuelve a su posición inicial y la máquina queda lista para repetir el proceso.

Este tipo de máquina tiene la ventaja de que la cámara de presión tiene la forma de un tubo liso, bien accesible, lo que permite una limpieza fácil y una lubricación adecuada, con lo cual la contaminación de la pieza se reduce al máximo [1].

3. El aluminio

El aluminio es uno de los principales componentes de la corteza terrestre conocida, de la que forma parte en una proporción del 8,13%, superior a la del hierro, que se supone es de un 5%, y solamente superada entre los metales por el silicio (26,5%) [25].

Sus aplicaciones industriales son relativamente recientes, produciéndose a escala industrial desde finales del siglo XIX. Cuando fue descubierto se encontró que era extremadamente difícil su separación de las rocas de las que formaba parte, por lo que durante un tiempo fue considerado un metal precioso, más caro que el oro; sin embargo, con las mejoras de los procesos los precios bajaron continuamente hasta colapsarse en 1889 tras descubrirse un método sencillo de extracción del metal. Actualmente, uno de los factores que estimula su uso es la estabilidad de su precio.

La invención del proceso Hall-Héroult en 1886 abarató el proceso de extracción del aluminio a partir del mineral, lo que permitió, junto con el proceso Bayer del mismo año, que se extendiera su uso hasta hacerse común en multitud de aplicaciones.

El proceso ordinario de obtención del metal consta de dos etapas, la obtención de alúmina por el proceso Bayer a partir de la bauxita, y posterior electrólisis del óxido para obtener el aluminio.

La elevada reactividad del aluminio impide extraerlo de la alúmina mediante reducción, siendo necesaria la electrólisis del óxido, lo que exige a su vez que éste se encuentre en estado líquido. No obstante, la alúmina tiene un punto de fusión de 2000°C, excesivamente alta para acometer el proceso de forma económica por lo que era disuelta en criolita fundida, lo que disminuía la temperatura hasta los 1000°C. Actualmente, la criolita se sustituye cada vez más por la criolita un fluoruro artificial de aluminio, sodio y calcio

El aluminio es un metal ligero, blando pero resistente de aspecto gris plateado. Su densidad es aproximadamente un tercio de la del acero o el cobre, es muy maleable y dúctil y apto para el mecanizado y la fundición. Debido a su elevado calor de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación proporcionándole resistencia a la corrosión y durabilidad [5] [6].

Tabla 3.1 Tabla general de las propiedades del aluminio [5] [6].

General	
Símbolo	Al
Número atómico	13
Grupo, periodo, bloque	13, 3, p
Densidad	2700 kg·m ⁻³
Propiedades atómicas	
Masa atómica	26,981538 uma
Radio medio	125 pm
Radio atómico calculado	118 pm
Radio covalente	118 pm
Oxidación	(+3)
Estructura cristalina	Cúbica centrada en caras
Propiedades físicas	
Estado de la materia	Sólido
Punto de fusión	933,47 K
Punto de ebullición	2792 K
Entalpía de vaporización	293,4 KJ/mol
Entalpía de fusión	10,79 KJ/mol
Información diversa	
Electronegatividad	1,61(Pauling)
Calor específico	900 J/(Kg·K)
Conductividad eléctrica	37,7·10 ⁶ S/m
Módulo de elasticidad	67000 N·mm ⁻²
Resistencia a la tracción	de 160 a 200 N·mm ⁻²
Conductividad térmica	237 W/(m·K)

3.1. Características físicas

Entre las características físicas del aluminio, destacan las siguientes:

- Es un metal muy ligero, cuya densidad o peso específico es de $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Tiene un punto de fusión bajo: 933 K (660°C).
- Es de color blanco brillante.
- Buen conductor del calor y la electricidad.
- Resistente a la corrosión, gracias a la capa de alúmina (Al_2O_3) formada.
- Abundante en la naturaleza.
- Material fácil y barato de reciclar [6].

3.2. Características mecánicas

Las propiedades mecánicas del aluminio son más interesantes son su débil resistencia mecánica, y su gran ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo, trefilarlo en hilos delgadísimo y laminarlo en láminas o panes tan finos como los del oro, hasta de un espesor de 0,0004 mm (0,4 micras). A la temperatura de 500°C se vuelve frágil y se puede pulverizar fácilmente [25].

3.3. Características químicas

Tanto el aluminio puro como las aleaciones de éste presentan una gran resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa fina (~ 4 y $5 \mu\text{m}$ de espesor) y adherente de óxido de aluminio sobre la superficie del metal. Esta capa de óxido constituye una película impermeable que impide la difusión del oxígeno hacia el metal base, haciendo al aluminio y sus aleaciones muy resistentes a la corrosión. Si en determinadas aplicaciones industriales se necesita una mayor resistencia a la corrosión, ésta se puede conseguir aumentando el espesor artificialmente de la capa por un procedimiento de oxidación profunda y, con posterioridad, colmatado por inmersión en agua caliente.

La resistencia química del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución así como de la pureza del metal. Por ejemplo, en ácido nítrico el aluminio de pureza 99,99% es mucho más resistente al ataque que el aluminio de pureza 99,5% [5].

3.4. Aplicaciones

El aluminio puro es blando y frágil, pero sus aleaciones con pequeñas cantidades de cobre, manganeso, silicio, magnesio y otros elementos presentan una gran variedad de características adecuadas a las más diversas aplicaciones. Estas aleaciones constituyen el componente principal de multitud de componentes de los aviones y cohetes, en los que el peso es un factor crítico.

Los principales usos industriales de las aleaciones metálicas de aluminio son:

- Transporte; como material estructural en aviones, automóviles, tanques, superestructuras de buques y bicicletas.
- Estructuras portantes de aluminio en edificios.
- Embalaje de alimentos; papel de aluminio, latas, tetrabriks, etc.
- Carpintería metálica; puertas, ventanas, cierres, armarios, etc.
- Bienes de uso doméstico; utensilios de cocina, herramientas, etc.
- Transmisión eléctrica. Aunque su conductividad eléctrica es tan sólo el 60% de la del cobre, su mayor ligereza disminuye el peso de los conductores y permite una mayor separación de las torres de alta tensión, disminuyendo el coste de la infraestructura.
- Recipientes criogénicos (hasta -200°C).
- Calderería.

Dada su gran reactividad química, finamente pulverizado se usa como combustible sólido de cohetes y en el explosivo termita, como ánodo de sacrificio y en procesos de aluminotermia para la obtención de metales.

Cuando se evapora aluminio en el vacío, forma un revestimiento que refleja tanto la luz visible como la infrarroja; además la capa de óxido que se forma, llamada pasivado, impide el deterioro del recubrimiento, por esta razón se ha empleado para revestir los espejos de telescopios, en sustitución de la plata [6].

3.5. Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar en importancia en la fundición a presión, después de las aleaciones de base de zinc. La producción de las piezas de este metal se ha casi triplicado durante los últimos años y su uso se ha generalizado prácticamente en todas las industrias.

Desde el punto de vista físico, el aluminio puro posee una resistencia muy baja a la tracción y una dureza escasa. En cambio, unido en aleación con otros elementos, el aluminio adquiere características mecánicas muy superiores. A estas aleaciones se las conoce con el nombre genérico de Duraluminio, y pueden ser centenares de aleaciones diferentes. El duraluminio contiene pequeñas cantidades de cobre (Cu) (3-5%), magnesio (Mg) (0,5-2%), manganeso (Mn) (0,25-1%) y zinc (Zn) (3,5-5%).

Son también importantes los diversos tipos de aleaciones llamadas anticorodal, a base de aluminio (Al) y pequeños aportes de magnesio (Mg) y silicio (Si). Pero pueden contener a veces manganeso (Mn), titanio (Ti) y cromo (Cr). A estas aleaciones se las conoce con el nombre de avional, duralinox, silumin, hidronalio, peraluman, etc.

Como en el mercado hay distintas composiciones de aluminio, es importante tener en cuenta las propiedades que éstas presentan, pues, en la industria de la fundición, unas son más favorables que otras [7].

3.6. Aportaciones de los elementos aleantes

A continuación se muestran los principales elementos aleantes del aluminio, y se enumeran las ventajas que estos proporcionan.

- **Cromo** (Cr). Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos, cobre (Cu), manganeso (Mn) y magnesio (Mg).
 - **Hierro** (Fe). Disminuye la adherencia al acero, aumenta la resistencia y la dureza, pero reduce considerablemente el alargamiento y la resiliencia.
 - **Cobre** (Cu). Aumenta la capacidad calorífica del caldo, con contenidos superiores al 3,8% aumenta la tendencia a los rechupes de contracción, a partir del 0,15% empeora la resistencia a la corrosión, y mejora la resistencia cuando se forman compuestos con el aluminio (Al).
 - **Magnesio** (Mg). Incrementa la resistencia tras el conformado en frío, aumenta la resistencia a la corrosión, empeora la fluidez y aumenta la tendencia a la pérdida por fusión.
 - **Manganeso** (Mn). Aumenta la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio.
 - **Titanio** (Ti). Aumenta la resistencia mecánica, pero aumenta la formación de gérmenes, especialmente en combinación con altos contenidos de magnesio (Mg), (es un afinador de grano).
 - **Zinc** (Zn). Aumenta la fluidez, con valores altos de hierro (Fe) aumenta la dureza y la resistencia notablemente, y a partir del 0,15% empeora la resistencia a la corrosión.
- Silicio** (Si). Endurece y sobre todo, aumenta la fluidez y la resistencia a la corrosión.
- **Níquel** (Ni). Aumenta la capacidad calorífica del caldo, junto con el cobre (Cu), mejora la termoresistencia, disminuye la fluidez y aumenta la formación de rechupes de solidificación [7] [25].

3.7. Clasificación de las aleaciones utilizadas en la fundición

Para agrupar las aleaciones usadas en la fundición por inyección, lo más lógico es tomar como base los pesos específicos y los puntos de fusión de las mismas.

Siguiendo este criterio, las aleaciones pueden clasificarse en tres grupos principales bien definidos:

Aleaciones pesadas de bajo punto de fusión:

Estas aleaciones tienen una temperatura de colada inferior a 460°C. Los metales básicos que las componen son: el plomo, el estaño y el zinc.

Aleaciones ligeras de elevado punto de fusión:

Estas aleaciones tienen una temperatura de colada hasta 700°C. Los metales básicos que las componen son: el aluminio y el magnesio. Este es el grupo al que pertenece la aleación elegida para simular la inyección de la pletina.

Aleaciones pesadas de elevado punto de fusión:

Estas aleaciones tienen una temperatura de colada hasta 1000°C. Los metales básicos que las componen son: el cobre y la plata.

A este último grupo pertenecen también las aleaciones férreas. La fundición por inyección de estas aleaciones, ocasiona muchas dificultades y sólo en condiciones determinadas puede llevarse a cabo.

Las aleaciones más utilizadas en la fundición por inyección, son las indicadas en los dos primeros grupos [1].

3.8. Aleación L-2630

La aleación de aluminio que hemos escogido para realizar la simulación del proceso de inyección es la L-2630, con designación simbólica Al-9Si3Cu3ZnFe. Es una aleación de segunda fusión.

La tabla 3.2 nos muestra la equivalencia de las nomenclaturas que recibe la aleación.

Tabla 3.2 Tabla de las equivalencias a la norma [8].

País	España	G.Bretaña	Alemania	Japón	EEUU
Norma	(UNE)	(BS)	(DIN)	(JIS)	(AA)
Nomenclatura	EN AC-46500	LM 24	G-AlSi9Cu3	ADC 10	380

Las tablas 3.3 y 3.4 muestran las propiedades físicas y mecánicas de la aleación L-2630 y su composición química.

Tabla 3.3 Tabla de las propiedades de la aleación L-2630 [8].

Propiedades	
Densidad a 20°C	2750 kg·m ⁻³
Intervalo de temperaturas de fusión	808 a 908 K (510 a 610°C)
Coeficiente de dilatación térmica	21,5 mm·(m·K) ⁻¹
Contracción de solidificación	1,20%
Conductividad térmica	110 A 120 W·(m·K) ⁻¹
Límite elástico	14 Kg·mm ⁻²
Módulo elástico	7250 Kg·mm ⁻²
Módulo de cizalladura	2700 Kg·mm ⁻²
Resistencia a la tracción	16
Alargamiento	<1%
Dureza	80 HB
Potencial electroquímico	-1,66 V

Tabla 3.4 Tabla de la composición química de la aleación en % en masa L-2630 [8].

Composición química en % de masa										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn	Al
8 a 11	1,3	2 a 4	0,55	0,05 a 0,55	0,6	3	0,3	0,35	0,25	Resto

La aleación L-2630 es una de las aleaciones de aluminio más utilizadas en la industria de la fundición, debido a que combina unas excelentes propiedades mecánicas con un coste moderado, en comparación con otras aleaciones.

En lo que refiere a fundición inyectada, esta aleación se caracteriza por su gran colabilidad en estado líquido, por su estanqueidad y por su gran resistencia a la rotura a altas temperaturas. Debido a su contenido en Silicio (Si) el cual varía entre un 8 y un 11 %, tiene tendencia a ser algo abrasiva.

Debido a su gran intervalo de solidificación (100°C), la aleación L-2630 dispone de un mayor tiempo de llenado de molde, con lo cual se pueden colar piezas de grandes diferencias de espesores y de formas complejas. Esto también beneficia en la no aparición de turbulencias a la hora de hacer el llenado, con lo cual habrá menos riesgos de que aparezcan rechupes o porosidades en la pieza.

Esta aleación posee una maleabilidad excelente y una resistencia a la corrosión moderada debido a su contenido de cobre (Cu). En lo que refiere a soldadura no se aconseja su uso.

La aleación L-2630 es utilizada en una amplia gama de sectores: automovilístico, aeronáutico, industria pesada, ferretería [9].

4. El molde

El molde, que también se llama matriz, es el elemento más delicado de la fundición a presión. De su correcto diseño y exacta construcción depende, principalmente, la obtención de piezas óptimas.

La matriz debe ser capaz de recibir y alojar al metal líquido que se introduce a una presión elevada. Su diseñador debe estudiar cuidadosamente el método más adecuado para dividir la matriz, la disposición correcta del bebedero, de los canales de refrigeración, de colada y de evacuación de aire, y el modo más apropiado para desprender la pieza una vez ya haya solidificado [1].

4.1. Material del molde

El material del molde debe ser resistente al choque térmico que provoca el metal fundido, al entrar en contacto con las paredes del molde, al ablandamiento y al desgaste a temperaturas elevadas. Su elección está relacionada con el tipo de aleación y su temperatura de colada.

Mientras que en las aleaciones a base de plomo (Pb) o de estaño (Sn) se emplean los aceros al carbono, en las aleaciones a base de cobre (Cu) se requieren aceros aleados [(3,5% Cr); (10% W); (0,5% V)], tratados térmicamente después de mecanizados. Respecto a las normas que se deben seguir para diseñar los moldes, deben consultarse tratados especializados [3].

4.1.1. Acero H13

El material escogido para la fabricación del molde es un acero H13. Este tipo de acero es uno de los más utilizados en la fabricación de moldes de fundición a presión, por tener unas propiedades excelentes que así lo demuestran.

En la tabla 4.1 se muestra la equivalencia de las diferentes nomenclaturas que recibe este acero:

Tabla 4.1 Tabla de las equivalencias a la norma [10].

Norma			
Crucible	AISI	DIN	JIS
UN-DIE V	H13	12.344	SKD 61

4.1.2. Características del acero H13

El acero H13 provee un buen balance de tenacidad, alta resistencia a la formación de grietas causadas por el choque térmico y resistencia al revenido, junto con una resistencia al desgaste moderada.

De temple al aire, es utilizado en la mayoría de las aplicaciones a durezas de 44-52 HRC.

Las temperaturas nominales de revenido del acero H13 son bastante altas (>540°C), lo cual permite que mantenga su dureza de temple y su resistencia al ser utilizado a temperaturas elevadas.

Las herramientas fabricadas con acero H13 pueden ser usadas a temperaturas de hasta aproximadamente 540°C con exposiciones breves de hasta 595°C, siendo ideal para dados de forja, herramientas para extruido en caliente y moldes de fundición a presión.

Sus aplicaciones típicas van destinadas a: dados de extrusión para aleaciones ligeras, camisas (Liners) para extrusión, herramientas para la fundición a presión, punzones y matrices para prensar, cuchillas para corte en caliente, moldes para plástico, insteros para dados, mandriles, pernos eyectores y dados de forja [10].

La tabla 4.2 muestra la composición química del acero H13 en % de masa, las propiedades mecánicas en la tabla 4.3 y las propiedades térmicas en la tabla 4.4.

Tabla 4.2 Tabla de la composición química del acero H13 [10].

Composición química en % de masa				
C	Si	Cr	Mo	V
0,4	1	5,2	1,3	0,95

Tabla 4.3 Tabla de las propiedades mecánicas del acero H13 [10].

Características mecánicas	
Módulo de elasticidad	207 Kg·mm ⁻²
Densidad	7750 kg·m ⁻³
Dureza en Rocwell C	46
Alargamiento	13%
Reducción del área	47%
Impacto de Charpy	25,8 J (Entalla en V)

Tabla 4.4 Tabla de las propiedades térmicas del acero H13 [10].

Características térmicas	
Conductividad térmica a:	
95°C	26 W·(m·K) ⁻¹
315°C	27,7 W·(m·K) ⁻¹
Coeficiente de dilatación térmica a:	
20-95°C	11·10 ⁻⁶ mm/mm/°C
20-425°C	12,2·10 ⁻⁶ mm/mm/°C
20-650°C	13,1·10 ⁻⁶ mm/mm/°C

El acero H13 es apropiado para nitrurar y recubrir con PVD. Los procedimientos de recubrimiento con CVD, generalmente rebasan la temperatura crítica y pueden provocar cambios dimensionales impredecibles.

La práctica de precalentar las herramientas en acero H13 antes de ser expuestas a temperaturas elevadas durante el servicio, mejora considerablemente su tenacidad [10].

4.2. Partes del molde

Debido a que los moldes están hechos de un metal rígido, los mismos se construyen de modo que puedan abrirse en dos mitades, y que puedan desprenderse las piezas fundidas sin dificultad. En cada mitad de la matriz se disponen las partes que impedirán la separación de la pieza colada, de manera que puedan moverse y ser retiradas una vez abierta la matriz (noyos móviles, correderas) [1].

En su forma más sencilla, el molde consta de dos mitades: una de ellas fija a la máquina por el lugar donde se efectúa la alimentación y denominada parte fija, y otra mitad móvil que denominamos parte móvil [3].

La parte móvil está fijada sobre una placa frontal de la máquina de fundir, ubicada al lado del crisol o de la cámara fría, según el tipo de máquina utilizado.

En la parte fija, llamada también matriz fija, se practica el orificio de alimentación o bebedero, que se acomoda a la embocadura de la máquina de inyección.

La parte móvil, está provista del mecanismo de eyección, y está fijada, por lo general, sobre una placa de soporte móvil, denominada también base, la cual está unida con la parte móvil de la máquina de inyección. Normalmente, la matriz de eyección contiene la mayor parte de la cavidad que define la forma exterior de la pieza fundida.

Los moldes de diseños complicados son contruidos frecuentemente en secciones, es decir, en varias partes. En esta clase de moldes, forman la superficie de la cavidad un determinado número de elementos hechos de acero y cuidadosamente ajustados entre sí. Esta disposición tiene la ventaja que permite modificar la forma de la pieza a inyectar, sin necesidad de construir un molde nuevo, reemplazando simplemente una o más secciones por otras de diseños diferentes.

El mecanismo que imprime el movimiento de vaivén a la parte móvil, consiste en un sistema de palancas articuladas; puede ser operado a mano, pero, por lo general, se recurre a una actuación hidráulica o neumática, es decir automatizada.

El mecanismo que se encarga de abrir y cerrar el molde debe cerrar herméticamente las dos partes de la misma, engatillándolas firmemente mientras dura la inyección y el enfriamiento del metal. Cuanto más elevada deba ser esta presión de cierre, proporcionalmente más rígida y fuerte deberá construirse la máquina de inyección, aumentándose en consecuencia el coste la misma [1].

4.3. Sistema de alimentación

Una de las operaciones de mayor responsabilidad en la tecnología de fabricación de moldes es el cálculo y diseño del sistema de alimentación.

En la práctica de fundición los defectos por causa de un sistema de alimentación de baja calidad, pueden representar hasta un 30% del total de defectos presentes en las piezas fundidas.

Las funciones principales que debe cumplir un sistema de alimentación, son las siguientes:

- Conducir el metal líquido a la cavidad del molde de forma suave y regulada,
- Separar la escoria del metal y evitar la presencia de gas y aire en la pieza.
- Garantizar las condiciones de solidificación necesarias.

El sistema de alimentación, para obtener una pieza por inyección, está formado por un conjunto de conductos, los cuales se exponen a continuación [3].

4.3.1. Ataques

Son los últimos elementos del sistema de distribución e introducen el metal en la cavidad del molde. Su número y disposición depende del tamaño y de la forma de la pieza. Así, en piezas de gran espesor, bastan pocos ataques y un canal de colada corto, mientras que, en piezas de grandes dimensiones y pequeño espesor, se requieren muchos ataques con varios canales de colada, de gran longitud y sección [3].

4.3.2. Respiraderos

Son conductos que se hacen en el molde para:

- Dar salida al aire y a los gases que se originan en el molde al colar el metal.
- Evacuar las inclusiones metálicas que hayan podido atravesar el *colector de escorias*.
- Regular la entrada de metal en el molde.

En los lugares donde la aleación solidifica en último lugar deben colocarse, para favorecer la salida de los gases que provienen del metal fundido.

Las piezas pequeñas no suelen llevar respiraderos, mientras que las grandes pueden llevar uno o más. Los respiraderos se sustituyen por mazarotas cuando la aleación que se va a colar tiene un elevado coeficiente de contracción [3].

4.3.3. Mazarotas

Las mazarotas se utilizan para alimentar a las piezas, con metal fundido durante el período de solidificación, con el fin de compensar las contracciones del metal, y evitar así la formación en las piezas de rechupes y porosidades.

Las mazarotas se colocan sobre las partes más densas y en los nudos térmicos de las piezas, en las cuales, como resultado de una solidificación lenta, se forman rechupes y se manifiesta una aguda porosidad.

El elemento que más influye en el volumen de contracción en los aceros, es el carbono, el cual a medida que aumenta, hace mayor la contracción.

Teóricamente, la mazarota debe compensar la contracción volumétrica y contener metal líquido hasta la total solidificación de la pieza, o del nudo alimentado. En los cálculos teóricos de las mazarotas, se toma en cuenta este volumen mínimo de contracción de metal líquido.

Las dimensiones reales de las mazarotas dependen de su colocación y tipo.

Al elegir el lugar donde deben colocarse las mazarotas, y elegir sus tipos, la cantidad, forma y dimensiones de estas, es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- Los rechupes se forman en los puntos de la pieza que se enfrían en último lugar, como son, las partes más densas, los engrosamientos locales, los nudos, articulación de las paredes y también los puntos de las piezas de los que se dificulta la extracción de calor.
- Los rechupes tienden a formarse en la parte superior de la pieza.
- Las mazarotas que se colocan en la pieza realizan diferentes funciones entre ellas: actuar como reserva de metal líquido para las diferentes partes de la pieza que solidifican en último lugar, propiciar la evacuación de gases y recolectar las inclusiones no metálicas que penetran en el molde.
- Para una acción efectiva de la mazarota, es necesario garantizar el principio de solidificación dirigida, o sea, que la temperatura aumente en el sentido de la mazarota (el metal más caliente debe estar en la mazarota).
- Si la pieza posee varios nudos térmicos, separados por paredes finas, cada una de ellas debe tener su propia mazarota, sin embargo debe tratarse de alimentar con una mazarota el máximo de nudos posibles.
- Para las piezas fundidas pequeñas y poco profundas de acero, el sistema de alimentación puede ser eliminado y el molde puede llenarse a través de una mazarota si la pieza fundida se llena usando una cuchara. En el caso de llenar el molde con una cuchara grande de vertido por el fondo, esto no puede hacerse debido a la alta velocidad de la corriente de metal.
- Debe tenerse en cuenta que las mazarotas hay que eliminarlas después de que la pieza haya solidificado [11].

5. Tipos de flujo

La circulación del metal líquido a través de los distintos conductos de alimentación está regida por las leyes de la dinámica de fluidos. Esto nos permite diseñarlos con criterio científico.

Todos los fluidos reales tienen un valor de viscosidad diferente de cero ($\mu \neq 0$). Con lo cual todos los fluidos reales se consideran viscosos.

El flujo viscoso se caracteriza porque al estar cerca de superficies sólidas (conductos de alimentación) tiene importantes gradientes de velocidad que provocan esfuerzos cortantes, efecto que se multiplica al trabajar con metales en estado líquido.

Si los flujos viscosos se encuentran en movimiento, estos se clasifican en dos grupos, laminares o turbulentos [12].

5.1. Flujo laminar

Este tipo de flujo se produce cuando el movimiento del fluido es perfectamente ordenado, estratificado, de manera que el fluido se mueve en laminas paralelas sin entremezclarse si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos (Figura 5.1).

La pérdida de energía mecánica por fricción del fluido con el conducto es proporcional a la velocidad media. El perfil de velocidades tiene forma de una parábola, donde la velocidad máxima se encuentra en el eje del tubo y la velocidad es igual a cero en la pared del tubo (Figura 5.2).

Se da en fluidos con velocidades bajas o viscosidades altas, cuando se cumple que el número de Reynolds es igual o inferior a 2300.

Se caracteriza porque el movimiento de las partículas del fluido se produce siguiendo trayectorias bastante regulares, separadas y perfectamente definidas dando la impresión de que se tratara de láminas o capas más o menos paralelas entre si, las cuales se deslizan suavemente unas sobre otras, sin que exista mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas [12].

En el flujo laminar predominan las *fuerzas viscosas* en frente de las *fuerzas de inercia*.

La ley de Newton de la viscosidad es la que rige el flujo laminar.

Esta ley establece la relación existente entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación angular. La acción de la viscosidad puede amortiguar cualquier tendencia turbulenta que pueda ocurrir en el flujo laminar. En situaciones que involucren combinaciones de baja viscosidad, alta velocidad o grandes caudales, el flujo laminar no es estable, lo que hace que se transforme en flujo turbulento [12].

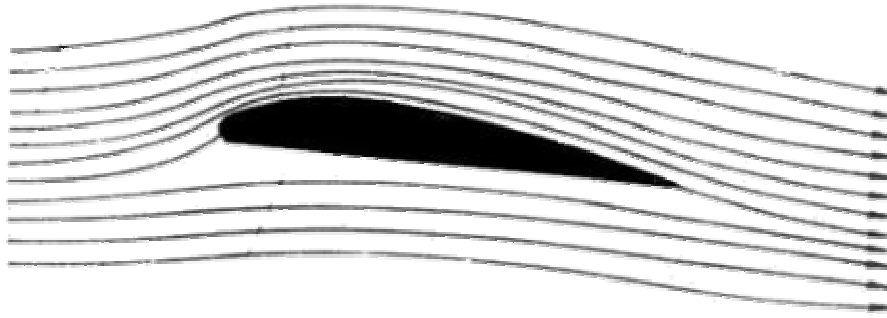


Figura 5.1 Líneas de flujo en un fluido laminar [13].

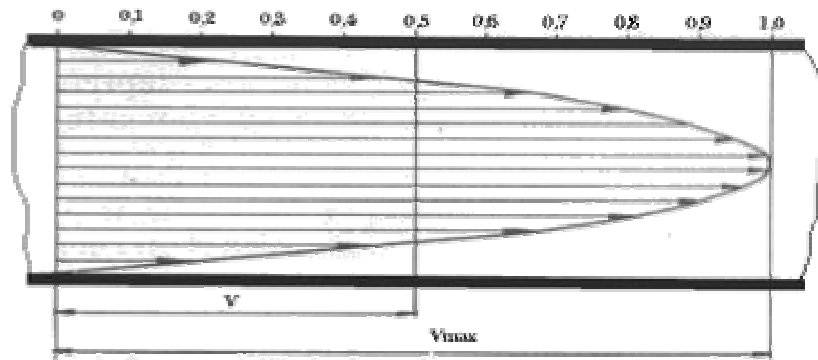


Figura 5.2 Perfil de velocidades en un fluido laminar [14].

5.2. Flujo turbulento

En este tipo de flujo el movimiento del fluido sucede de forma caótica (Figura 5.3).

Las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos, como por ejemplo el agua en un canal de gran pendiente. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de la misma es impredecible.

En el flujo turbulento predominan las *fuerzas de inercia* sobre las *fuerzas viscosas*.

Se considera que un flujo es turbulento cuando el número de Reynolds es igual o superior a 4000 [12].



Figura 5.3 Líneas de flujo en un fluido turbulento [15].

5.3. Numero de Reynolds

El cociente entre la fuerza inercial y la fuerza de fricción en un fluido se conoce como el número de Reynolds. Este es un parámetro adimensional que está relacionado con el comportamiento del flujo [26].

El Número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del flujo, es decir, si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento, además, indica la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición relativa de este estado dentro de una longitud determinada.

Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883, y viene dado por las siguientes fórmulas [16]:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad [\text{Ec.5.1}]$$

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad [\text{Ec.5.2}]$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{Ec.5.3}]$$

Donde:

ρ = densidad del fluido.

v = velocidad del fluido.

D = diámetro de la tubería a través de la cual circula o se inyecta el fluido.

μ = viscosidad del fluido.

ν = viscosidad cinemática del fluido

Según cuál sea el número de Reynolds, el flujo en conducciones se clasifica de la siguiente forma [12]:

$Re \leq 2300$ = Flujo Laminar

$2300 < Re < 4000$ = Flujo de Transición

$Re \geq 4000$ = Flujo Turbulento

A la hora de proceder con el llenado de un molde, el sistema de alimentación de dicho molde ha de procurar que no se produzca flujo turbulento en su interior sino todo lo contrario, pues esto podría provocar la aparición de micro rechupes y porosidad en la pieza.

En el caso a estudio al tratarse de un proceso de fundición inyectada, en el cual el llenado del molde se produce prácticamente al instante debido a la alta velocidad de la colada, hay que verificar si se produce turbulencia o no.

Puesto que se conocen las velocidades propuestas para realizar la inyección, la densidad del material a inyectar y el diámetro de la galleta, se calcula el número de Reynolds para cada una de ellas.

Para los cálculos con una velocidad de inyección de $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se obtiene:

$$Re = \frac{2,75 \cdot 0,2 \cdot 0,2286}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 8382 \text{ [Ec.5.4]}$$

Con lo cual se puede afirmar que con estas condiciones se produce flujo turbulento, ya que $Re > 4000$.

Para los cálculos con una velocidad de inyección de $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se obtiene:

$$Re = \frac{2,75 \cdot 0,3 \cdot 0,2286}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 12575 \text{ [Ec.5.5]}$$

Con lo cual se puede afirmar que con estas condiciones también se produce flujo turbulento, ya que $Re > 4000$.

Para los cálculos con una velocidad de inyección de $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se obtiene:

$$Re = \frac{2,75 \cdot 0,4 \cdot 0,2286}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 16764 \text{ [Ec.5.6]}$$

Con lo cual se puede afirmar que con estas condiciones también se produce flujo turbulento, ya que $Re > 4000$.

Para los cálculos con una velocidad de inyección de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se obtiene:

$$Re = \frac{2,75 \cdot 0,5 \cdot 0,2286}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 20955 \text{ [Ec.5.7]}$$

Con lo cual se puede afirmar que con estas condiciones también se produce flujo turbulento, ya que $Re > 4000$.

En todos los cálculos se toma como valor constante el diámetro de la galleta, que es, $D = 9$ pulgadas (0.2286m).

La densidad de la aleación también se considera constante, ya que no hay grandes variaciones de temperatura.

Debido a que, conseguir flujo laminar con estas condiciones es imposible, lo único que se puede hacer es vigilar la aparición de los defectos antes anunciados.

6. Defectología

La técnica moderna exige cada vez mejores características mecánicas y de utilización en las piezas fundidas. El avance en este campo se ha podido conseguir gracias a los numerosos trabajos de investigación encaminados a obtener piezas sanas, económicas y resistentes con aleaciones de todo tipo. Esto ha requerido una estrecha coordinación entre modelistas, fundidores y proyectistas, para mejorar las condiciones de moldeo, colada y diseño de piezas, con el objetivo de eliminar los posibles defectos de la fundición. Como existe una gran variedad de ellos (rechupes, tensiones internas, deformaciones, roturas, porosidades, etc.), a continuación se explican los más destacados, tratando de conocer sus posibles causas y la forma de corregirlos. Para facilitar su estudio, están agrupados según las causas capaces de producirlos [3].

6.1. Defectos debidos a la contracción

La contracción excesiva significa que las dimensiones de la pieza diferirán de las esperadas, esta disminución de volumen que experimenta la aleación puede dar paso a los siguientes defectos [17]:

6.1.1. Rechupes

Un rechupe ya sea grande o pequeño, resulta de los distintos valores de la contracción, mientras el metal pasa del estado líquido al sólido.

Un verdadero rechupe es una cavidad asimétrica o área esponjosa, limitada por una bella superficie de cristales dendríticos, y una depresión de rechupe sobre la superficie de una pieza es un descenso del verdadero plano de la superficie del molde [18].

Una de las formas para evitar la aparición de rechupes es con el uso de mazarotas o la solidificación dirigida. A continuación se explican las normas a que debe ajustarse el diseño de las piezas, con vistas a eliminar las acumulaciones de masa o puntos calientes que, por solidificar en último lugar, pueden dar origen a rechupes.

En el diseño de las piezas se deben seguir las siguientes reglas:

1ª) Hay que evitar las concentraciones locales de masas, o lo que es igual, conseguir que los espesores se mantengan tan uniformes como sea posible en toda la pieza. Esto queda resumido en la regla de los círculos inscritos, según la cual, los diámetros de los círculos inscritos en las distintas secciones rectas de la pieza deben ser iguales o muy poco diferentes. En la figura 6.1 vemos algunos ejemplos de esta regla [3].

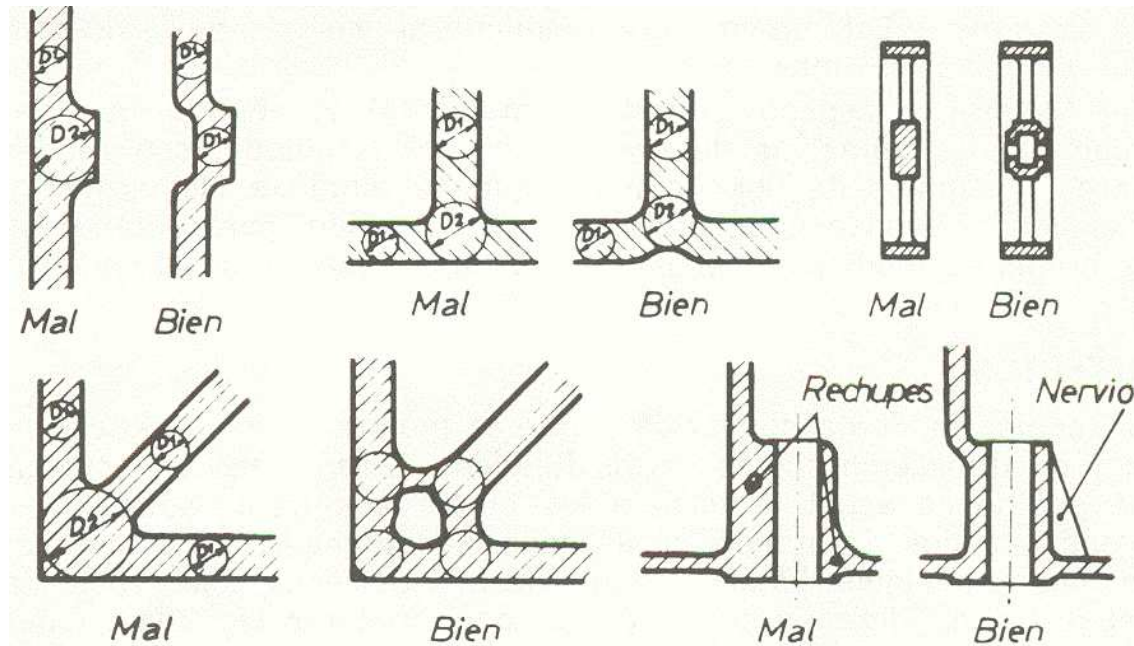


Figura 6.1 Ejemplos 1ª regla de los círculos inscritos [3].

2ª) En los casos en que sea imposible mantener la uniformidad de los espesores hay que procurar que, estando la pieza en posición de colada, las secciones transversales vayan aumentando de espesor en función de la altura. Esta condición queda resumida en la segunda regla de los círculos inscritos, según la cual: Si no es posible mantener los espesores constantes, se procurará que su aumento sea progresivo de abajo hacia arriba en la posición de moldeo, o bien, los diámetros de los círculos inscritos en las secciones rectas de la pieza deben crecer lentamente desde la sección más baja de la pieza, en la posición del molde hacia arriba. Adoptando este trazado, se consigue una solidificación dirigida de abajo a arriba, que hace el efecto de una mazarota. En la figura 6.2 se indican algunos ejemplos de esta regla [3].

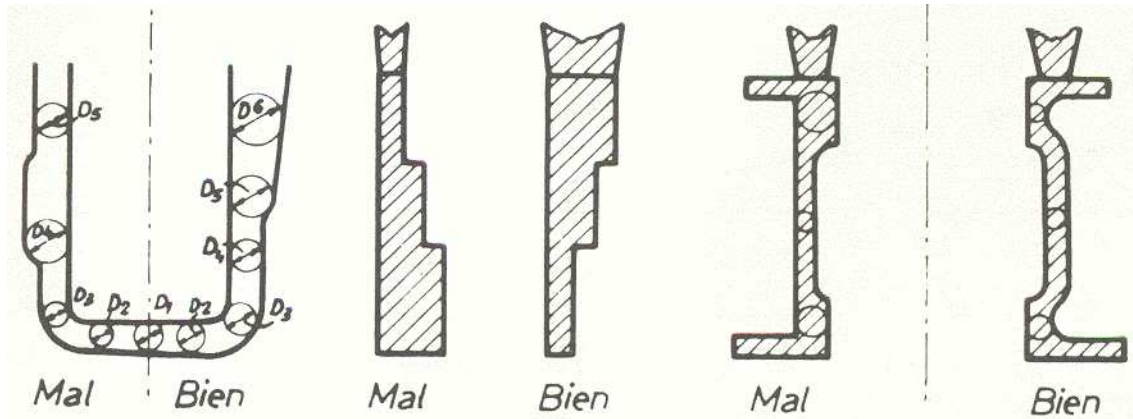


Figura 6.2 Ejemplos 2ª regla de los círculos inscritos [3].

3ª) Evitar los efectos de los ángulos. Cuando una pieza presenta ángulos, la velocidad de solidificación en los vértices de los ángulos salientes, es mayor que la de las zonas adyacentes. El fenómeno es debido a que un volumen de metal situado en el vértice tiene mayor superficie de contacto con el molde y, por tanto, mayor velocidad de enfriamiento que otro volumen igual más alejado de él. El efecto es más intenso cuanto más agudo es el ángulo.

En los ángulos entrantes sucede todo lo contrario, es decir, que la velocidad de solidificación es mucho menor en el vértice que en las zonas adyacentes. La explicación del fenómeno es bien sencilla, ya que, según solidifica la pieza, un volumen de metal líquido situado en el vértice, no tiene prácticamente superficie de contacto con el molde, por tanto, su velocidad de enfriamiento será muy inferior a la de otro volumen igual situado en una zona más alejada. Aquí también el efecto es más intenso cuanto más agudo es el ángulo.

En consecuencia, en las piezas con ángulos agudos entrantes, se originan zonas calientes que pueden producir rechupes y grietas, por tanto, dichos ángulos deben evitarse a toda costa en las piezas moldeadas.

Estos efectos se pueden evitar en parte empleando diseños adecuados de las piezas, en los que se supriman los cambios bruscos de sección (ángulos agudos entrantes), sustituyéndolos por radios de unión adecuados o uniones progresivas.

A continuación se muestran diferentes uniones a modo de ejemplo, para evitar estos efectos [3].

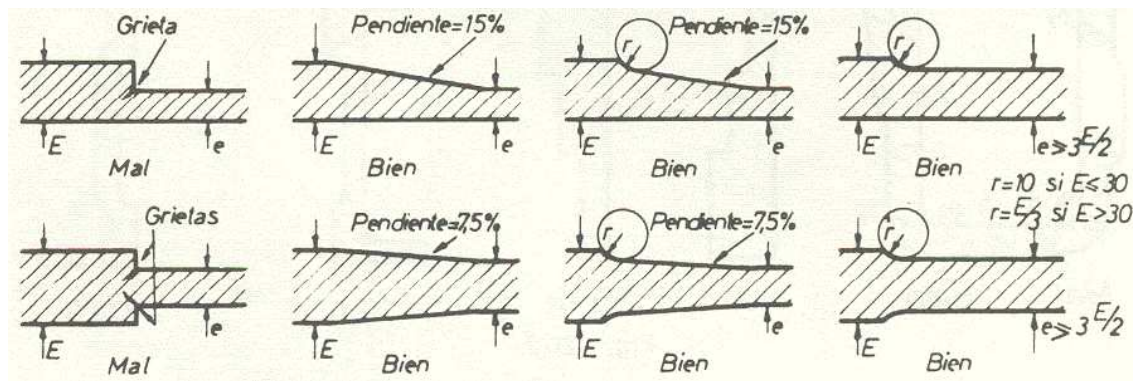


Figura 6.3 Ejemplos de cómo unir paredes de espesor desigual en prolongación [3].

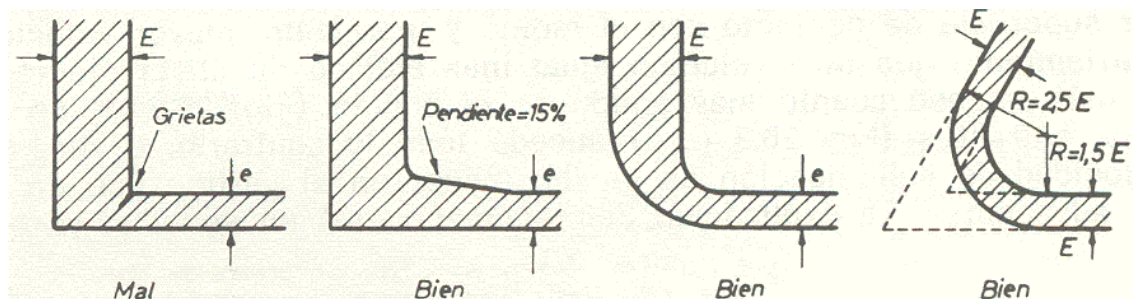


Figura 6.4 Ejemplos de cómo unir dos paredes de espesor desigual que forman cierto ángulo [3].

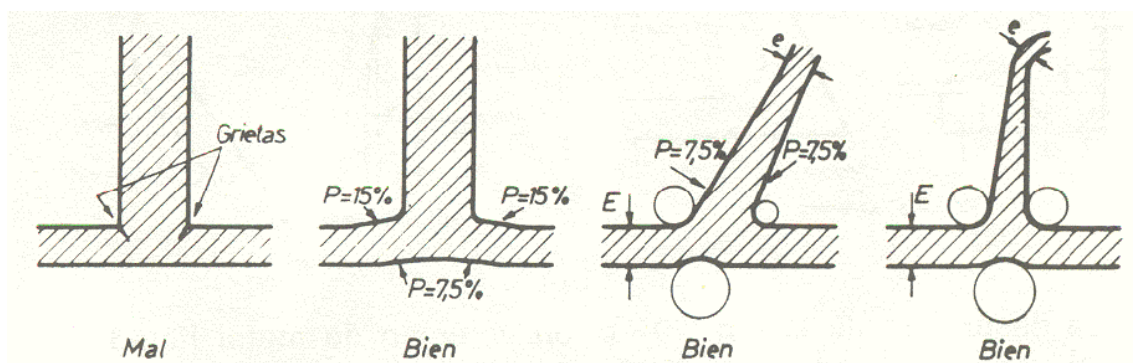


Figura 6.5 Imagen de cómo unir dos paredes que forman una T [3].

6.1.2. Tensiones internas. Grietas y deformaciones

Para que una pieza moldeada esté exenta de tensiones internas, tanto durante su enfriamiento como después del mismo, es necesario, en primer lugar, que toda su masa se conserve isotérmica, desde el final de la solidificación hasta que alcance la temperatura ambiente. Para conseguirlo se deben utilizar sistemas de alimentación que no generen grandes diferencias de temperatura en las distintas zonas de las piezas; al mismo tiempo los moldes se deben construir de forma que no impidan la libre contracción.

Cuando se producen tensiones internas, los esfuerzos resultantes son capaces de producir roturas, grietas y deformaciones (Figura 6.6).

Este fenómeno es especialmente intenso cuando el metal está aún en estado pastoso (dendritas + líquido) o inmediatamente después de la solidificación, cuando su resistencia es todavía muy baja. Las grietas pueden ser superficiales o internas [3].

Una grieta o rajadura formada durante el enfriamiento de la pieza tiene generalmente la superficie de rotura decolorada, pudiendo variar de azulada a rojiza. Una fractura limpia o recién hecha indica una grieta originada por causas mecánicas o tensiones externas, una vez se ha enfriado completamente la pieza [18].

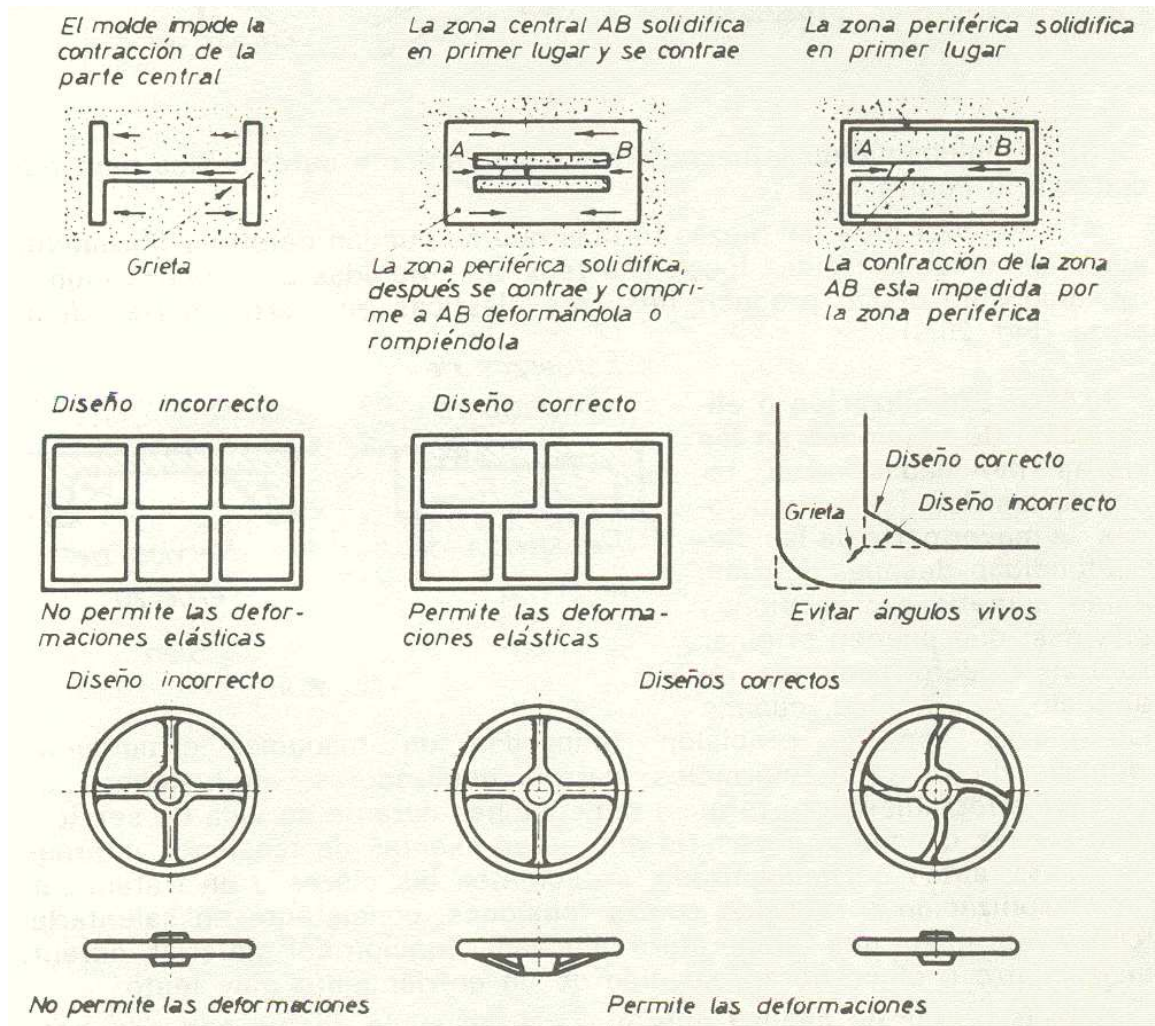


Figura 6.6 Ejemplos de cómo se puede corregir la formación grietas y deformaciones en las piezas [3].

Estos efectos pueden evitarse, en cierto modo, si se tienen en cuenta las siguientes reglas:

1ª) Diseñar las piezas de forma que se mantengan los espesores constantes y se supriman los cambios bruscos de sección (ángulos agudos entrantes) sustituyéndolos por radios de unión adecuados o uniones progresivas (Figuras 6.3, 4 y 5).

2ª) Comenzar el llenado del molde por las partes más delgadas y acelerar el enfriamiento de las más voluminosas con enfriadores externos o internos.

3ª) Emplear molde y machos lo suficientemente deformables para que cedan a la contracción. Contener travesaños de la caja de moldear extendidos dentro de profundas bolsas del molde, que no permiten la correcta contracción de la pieza fundida.

4ª) Adoptar sistemas para que las piezas puedan deformarse libremente, con el fin de que no generen ninguna rigidez local [3] [18].

Aunque se tomen las debidas precauciones, la mayor parte de las piezas fundidas, después de frías, están sometidas a tensiones internas, que pueden originar roturas o deformaciones en servicio. Cuando las piezas son de precisión (bancadas de máquinas-herramientas, camisas de motores, mármoles, carros, deslizadera, etc.) deben conservar perfectamente su forma y dimensiones durante su vida de servicio; para ello es necesario que estas piezas estén exentas de tensiones internas. Para conseguirlo, las piezas son sometidas antes del mecanizado, a un tratamiento de estabilización o recocido contra tensiones, el cual consiste en calentarlas lentamente hasta una temperatura adecuada, en función del material, durante cuatro o cinco horas, seguido de un enfriamiento muy lento.

En las piezas de calidad muy eleva, se suele realizar un segundo tratamiento de estabilización, después del mecanizado principal y antes del acabado final.

También se puede conseguir la estabilización natural, dejando que las piezas envejezcan a la intemperie, durante uno o dos años, pero esto evidentemente tiene el inconveniente de la lentitud del proceso [3].

6.2. Defectos debidos a los gases

Durante la colada de la aleación en el molde, se produce un desprendimiento gaseoso procedente:

- Del metal, que como cualquier otro líquido, disuelve gases en cantidad limitada, dependiente de la temperatura y presión. Estos gases los absorbe la atmósfera del horno durante la fusión y los desprende durante la solidificación. Los más frecuentes son: H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 , SO_2 .
- De los materiales empleados en la confección del molde y de los machos.

Cuando la evacuación de los gases no se completa, algunos pueden quedar aprisionados en la aleación después de solidificar, en forma de porosidades o sopladuras [3].

6.2.1. Sopladuras, porosidad y ampollas

Son cavidades redondas, unas veces esféricas, otras aplastadas o bien alargadas, producidas por la generación o acumulación de gases o aire encerrado durante el proceso de solidificación del metal en el interior de la cavidad moldeada. Varían en tamaño sobre una amplia gama, y las paredes pueden variar en color. Las sopladuras producidas por burbujas de gas encerradas en el metal se encuentran rara vez en la superficie inferior de la pieza. Pueden presentarse como una lisa y uniforme depresión sobre los lados o en la parte superior, o bien como una serie de desiguales e irregulares depresiones en la parte alta de la pieza, especialmente cuando se trata de piezas que tienen superficies planas en dicha zona.

Las sopladuras de machos se muestran generalmente sobre la superficie en contacto con los machos o cerca de ella.

La porosidad es producida por el vapor o gas que atraviesa el metal en estado líquido, y puede ir acompañada de lodo, sedimentos o tierra (escoria del molde). A pesar de todo, es un defecto que se clasifica como sopladura, aunque a veces parezca un rechupe y como tal sea considerado.

Las ampollas son sopladuras con una tenue película de hierro sobre ellas, que aparecen en las superficies de las piezas [18].

Estos defectos pueden evitarse siguiendo las siguientes indicaciones:

- Disponiendo la colada de forma que los gases puedan ascender libremente y salir a través de la mazarota.
- Pinchando vientos en los lugares adecuados del molde.
- Atacando la arena del molde de forma que la permeabilidad sea máxima.
- Colocando los machos de forma que sus conductos de evacuación estén en comunicación con el exterior.
- Empleando una temperatura de colada lo más baja posible y dejando la aleación en reposo durante un cierto tiempo, para que se desprenda la mayor cantidad de gases.
- Efectuando la fusión y la colada en vacío [3].

6.3. Inclusiones

Son partículas no metálicas de materiales mezclados en la aleación, que inevitablemente se encuentran en el metal fundido en el momento de la colada, y que accidentalmente pueden incorporarse durante ella. Si estas inclusiones están en la superficie de la pieza, quedan generalmente separadas durante la limpieza de la misma, dejando tan sólo los huecos.

También pueden producirse por inclusiones en la cuchara y que no han sido perfectamente disueltas por el metal [18].

Estas inclusiones pueden producir discontinuidades en la masa metálica, con lo cual pueden afectar a las características mecánicas de la pieza. A las procedentes del metal se les denomina naturales o endógenas y a las otras, accidentales o exógenas. Las primeras suelen estar formadas por óxidos, silicatos y sulfuros, mientras que las segundas están constituidas por trozos de material refractario, escorias, arena, óxidos y partículas metálicas, procedente de las paredes del molde [3].

6.4. Segregaciones

Como consecuencia del proceso de solidificación, las aleaciones en el estado sólido presentan cierta heterogeneidad en su composición química, que se conoce con el nombre de segregación. Este fenómeno provoca que ciertos elementos de la aleación o las impurezas, se concentren en determinadas regiones de las piezas fundidas.

Este fenómeno se da especialmente con las aleaciones que contienen grafito.

Se pueden considerar tres tipos fundamentales de segregación:

- **Centrípeta o directa.** Formada por las impurezas que rebajan el punto de solidificación y que se concentran en la zona líquida que solidifica en último lugar.
- **Inversa.** Formada en las zonas exteriores por los elementos que disminuyen la temperatura de fusión.
- **Vertical.** Este tipo de segregación aparece en las aleaciones (Pb-Sb) que tienen una diferencia de densidad apreciable entre las fases líquida y sólida. Se forman primeramente unos cristales de Sb que, por ser menos densos que el líquido, tienden a subir a la superficie [3] [18].

6.5. Defectos debidos a la colabilidad

La colabilidad se define como la mayor o menor aptitud de una aleación para llenar un molde.

El exceso de colabilidad es perjudicial, porque la aleación puede infiltrarse entre los granos de arena, o en nuestro caso por las juntas del molde y de los machos. En cambio la falta de colabilidad puede dar lugar a la falta de llenado del molde, sobre todo en las partes delgadas. Para evitar esto habrá que calcular la temperatura óptima de colada, en función del material [3].

6.6. Defectos debidos a la aleación fría

Cuando la aleación en el momento de colada está demasiado fría, o cuando los conductos de alimentación no se han dispuesto convenientemente, existe el peligro de que el molde no se llene totalmente y la pieza salga incompleta.

Los pliegues y arrugas que presentan en la superficie algunas piezas, son también imputables a la aleación fría.

Si se interrumpe el llenado del molde y acto seguido se continúa, existe el peligro de que la parte que penetra primero en el molde solidifique y no se una con la segunda, dando lugar a una unión fría [3].

6.7. Clasificación de los defectos de fundición

El Congreso Internacional de Fundición de Bruselas de 1951 propuso una clasificación en la que los defectos se definen por: su forma, aspecto, situación y dimensiones. Se adopta la clasificación decimal y cada defecto queda definido por un número. A continuación en la tabla 6.7 podemos observar esta clasificación [3].

Tabla 6.7 Clasificación internacional de los defectos de fundición [3].

Numero	Defecto
1000	Protuberancias
2000	Cavidades
3000	Faltas de continuidad
4000	Defectos superficiales
5000	Pieza incompleta
6000	Dimensiones o forma incompleta
7000	Inclusiones o heterogeneidades
8000	Deformaciones
9000	Defectos de manifiesto en los ensayos

6.8. Inspección de las piezas fundidas

Todas las piezas obtenidas por moldeo deben cumplir las condiciones que se especifiquen en el peligro de condiciones. Para ello, antes de entregarlas al cliente, y siempre antes de entrar en servicio, deben someterse a una rigurosa inspección, con el objetivo de detectar posibles defectos que las hagan inservibles. Los métodos de inspección más corrientes son:

- Examen visual de la pieza, se realiza inmediatamente después del desmolde, para evitar los gastos de limpieza con defectos bien visibles.
- Control de dimensiones, se realiza para comprobar que la pieza está dentro de las tolerancias permitidas.
- Prueba de sonoridad, se efectúa para saber si la pieza está sana o por el contrario en su interior hay alguna grieta.
- Ensayos no destructivos para detectar tanto los defectos superficiales como los internos, que no son visibles en el control visual. Estos ensayos se realizan mediante rayos X, rayos gamma, ultrasonidos, etc.
- Examen metalográfico, se realiza para determinar el tamaño de grano, constituyentes estructurales, microporosidades, inclusiones no metálicas, etc.
- Ensayos mecánicos, se realizan para determinar la resistencia, se efectúan sobre probetas fundidas con la pieza o con probetas fundidas aparte. También se

realizan los ensayos de dureza, tracción, flexión, cizalladura, compresión, resiliencia, fatiga, etc.

- Análisis químico, con el se comprueba si la composición de la aleación utilizada se encuentra dentro de los límites deseados.
- Acabado superficial, su valoración se efectúa con un rugosímetro para comprobar que el acabado superficial es el deseado [3].

7. Simulación asistida por ordenador

En la actualidad el uso del ordenador como herramienta de trabajo para elaborar el diseño de cualquier pieza industrial, es imprescindible. No obstante, la creatividad humana es vital para poder inventar las formas y realizar los proyectos.

Denominamos herramientas de diseño asistido a un conjunto de herramientas que permiten el diseño asistido por ordenador. Es frecuente utilizar la sigla CAD, del inglés Computer Aided Design, para designar al conjunto de herramientas de software orientadas fundamentalmente, pero no exclusivamente, al diseño (CAD), la fabricación (CAM) y el análisis (CAE) asistidos por computadora en los ámbitos científico e industrial [19].

La tabla 7.1 muestra las principales herramientas utilizadas para el diseño asistido por ordenador.

Tabla 7.1 Diferentes herramientas para el diseño asistido por ordenador [20].

CAD	Diseño asistido por ordenador
CAE	Ingeniería asistida por ordenador
CAM	Fabricación asistida por ordenador
CAI	Verificación asistida por ordenador
CIM	Fabricación integrada por ordenador

El CAD está formado por herramientas que se utilizan para el diseño del producto.

El CAE verifica que el producto diseñado mediante los programas de CAD cumpla todas las solicitudes a las que va a ser sometido.

El CAM estudia los medios con los que se va a fabricar el producto, el tiempo y los métodos de fabricación (simulación del mecanizado).

El CAI encargado del proceso de verificación y control de la calidad.

El CIM integra todos los anteriores y es el que pretenden alcanzar todas las empresas. Diseñar, calcular, fabricar e inspeccionar [19] [20].

Actualmente estos sistemas están conectados a los sistemas de gestión y producción de tal forma que ya desde la fase de diseño se puede saber el coste del producto final, controlar los stocks de componentes y materiales para su fabricación [19].

7.1. Método de elementos finitos (MEF)

Este método es una de las herramientas más utilizadas por el sistema CAE. Es por ello, que es utilizado por muchos de los programas de simulación que podemos encontrar hoy en día. Como es el caso de los utilizados en este proyecto, ProCAST y Vulcan. Ambos programas utilizan este sistema como base de cálculo, debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones).

El método de los elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes, “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los parámetros discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

El MEF, por lo tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado; esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos [21].

7.2. Programa ProCAST

Este programa ha sido utilizado para realizar la simulación del proceso de inyección a alta presión del componente pletina motocicleta.

Se utiliza para simular los procesos de inyección y solidificación de piezas en fundición. ProCAST se divide en seis módulos de trabajo y, su sistema de cálculo se basa en el método de los elementos finitos (MEF) antes explicado. La versión de ProCAST utilizada en este proyecto es la 2007.

Lo primero que se necesita para trabajar con ProCAST es haber creado la geometría de la pieza con un sistema auxiliar de CAD, puesto que ProCAST consta con un sistema de diseño asistido bastante limitado, esto hace que sea mejor trabajar antes el diseño de la pieza con otro programa de diseño más sofisticado. Pese a que los programas de diseño compatibles con ProCAST son bastantes, Patran, Ideas, Yunque, Ansys, ProEngineer, Catia, Ifem y Gfem. La buena elección del programa de diseño puede simplificar bastante la preparación de la simulación con ProCAST [22] [23].

Desde que se crea el diseño de la pieza, hasta que realizamos la simulación completa, ProCAST divide todo el proceso en varias operaciones, que a continuación se enumeran:

1ª Cargar o crear un modelo: Cada proyecto de ProCAST se inicia generando una geometría sólida de los objetos que se van a someter a la simulación. Para conseguir cargar un modelo existente o crear uno nuevo ProCAST permite:

- Leer geometrías sólidas creadas con los programas compatibles antes anunciados.
- Chequear geometrías realizadas 2D y generar la malla en 2D con el módulo de PreCAST.
- Leer archivos de superficies geométricas almacenados en formato IGES y generar una malla en 2D o 3D gracias al módulo MeshCAST.

2ª Reparar la geometría: Se comprueba automáticamente la geometría del fichero y las posibilidades de corregir los defectos de carga.

3ª Comprobar el modelo: El módulo DataCAST lee y procesa los parámetros introducidos, comprueba la definición del problema planteado y averigua que no hayan errores y crea los archivos que serán leídos por el módulo encargado de realizar la simulación. Si el módulo DataCAST detecta algún error, este deberá ser corregido antes de proceder al módulo de simulación.

4ª Comenzar la simulación: Se realiza la simulación íntegramente mediante la CPU.

5ª Extraer resultados: Los resultados de la simulación quedan contenidos en una variedad de archivos de volumen bastante amplio.

6ª Discusión de resultado: El módulo ViewCAST nos permite visualizar los resultados de la simulación [23].

7.2.1. Módulos de ProCAST

A continuación se describen los seis módulos de trabajo en los que se divide ProCAST.

MeshCAST: Es el generador tetraédrico de malla de 2D y 3D de ProCAST. Es el primer módulo y proporciona los recursos para la lectura y obertura del CAD, 2D y 3D los chequeos de la calidad de la geometría y las reparaciones necesarias para la generación de la malla.

PreCAST: Es el módulo de ProCAST donde se introducen las condiciones de contorno, condiciones de inyección, materiales, etc. Para realizar el cálculo de todos los parámetros que deseamos calcular.

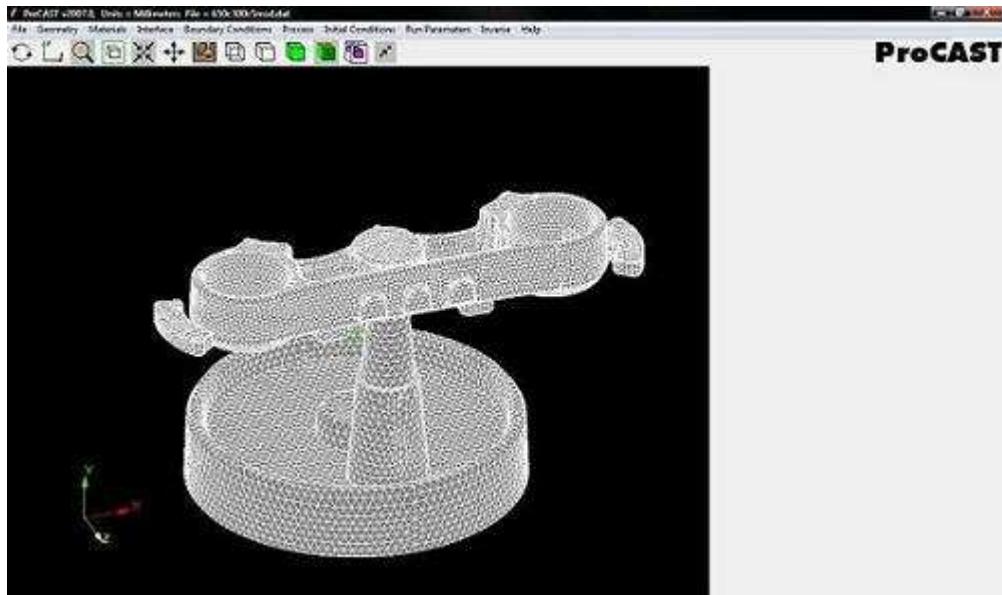


Figura 7.1 Imagen de la malla generada con el módulo PreCAST

DataCAST: Es el módulo que lee los datos del módulo PreCast, comprueba el problema planteado, transforma todas las unidades en unidades de CGS y crea los archivos binarios que serán leídos por el modulo de simulación ProCAST.

ProCAST: Es el módulo de ProCAST que realiza la simulación de todo el proceso de inyección y solidificación, realiza el análisis de los elementos finitos y genera los resultados de todo el proceso de la simulación.

Status: Es el módulo que permite saber el número de pasos calculados durante el proceso, el porcentaje de proceso calculado y de tiempo empleado.

ViewCAST: Es el modulo que permite visualizar todos los resultados de la simulación y realizar mapas de contorno de los diferentes parámetros [23].

7.3. Programa Vulcan

Este programa es con el que se va a realizar la simulación del proceso de inyección a alta presión del componente pletina motocicleta, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con ProCAST.

Vulcan como ProCAST es un programa que se utiliza para simular los procesos de inyección y solidificación de piezas obtenidas por fundición. Su método de cálculo como sucede con ProCAST está basado en el método de los elementos finitos (MEF)

antes explicado. Vulcan nos permite importar geometrías, se recomienda haber creado la geometría de la pieza con un sistema auxiliar de CAD más sofisticado, ya que su sistema de diseño asistido es bastante limitado, como sucede con ProCAST.

Vulcan posee dos módulos de simulación: un primer módulo de cálculo fluido-dinámico (CFD) para la simulación del proceso de llenado de moldes y un segundo módulo termo-mecánico acoplado (CTM) para los análisis de solidificación y enfriamiento de las piezas. El programa funciona en plataforma PC (sistema operativo Windows) y permite la simulación de:

Pre-calentamiento del molde: Ciclos de calentamiento y enfriamiento sucesivos para obtener el mapa de temperaturas del molde en régimen de trabajo (útil para la fundición con molde permanente).

Llenado de moldes con metal líquido: llenado por gravedad y a presión (low-pressure and high-pressure die-casting).

Solidificación de la pieza dentro del molde.

Desmolde: enfriamiento de la pieza una vez retirada del molde.

La interfaz del programa permite al usuario definir el problema y realizar la simulación tan fácilmente como sea posible [24].

7.3.1. Aspectos específicos de Vulcan

Algunos de los aspectos específicos más importantes que caracterizan a este programa son:

CAD Interface:

- El software da la posibilidad al usuario de leer diferentes formatos de CAD (IGES, VDA y DXF).
- Es posible combinar diferentes geometrías en un único modelo y es también posible modificar la geometría original utilizando las herramientas CAD que posee Vulcan. El molde, los conductos de enfriamiento o el sistema de llenado pueden ser modificados durante la fase de Pre-Proceso.
- Las superficies que definen la entrada del fluido en el molde son detectadas automáticamente.

Generación de mallas:

- El generador de mallas de elementos finitos que incluye el programa es semiautomático. Sin embargo la calidad y el tamaño de los elementos pueden ser controlados muy fácilmente de acuerdo a las necesidades del problema.
- La interfaz de Vulcan permite leer mallas generadas por otro generador externo (formato Nastran).

Base de datos de Materiales:

- Vulcan dispone de una extensa base de datos de materiales que incluye todos los parámetros necesarios para la simulación. Cualquiera de estos parámetros puede ser modificado por el usuario de acuerdo a su experiencia.
- La transmisión del calor por conducción o por convección entre todos los componentes del modelo conjuntamente con la definición de los correspondientes parámetros de transferencia de calor HTC se realiza automáticamente tanto para un análisis de llenado como de solidificación.

Post-procesamiento de los resultados:

- El post-procesador presenta una forma fácil de visualizar los resultados permitiendo al usuario evaluarlos e interpretarlos de forma muy eficiente.
- El estudio de los resultados de la simulación se puede realizar visualizando gráficas y mapas de evolución de las principales variables del problema en cada instante del análisis. De la misma manera es posible estudiar el problema en el interior de las piezas efectuando cortes y secciones de las mismas.
- La información post-procesada puede ser fácilmente extraída a través de imágenes en diferentes formatos (JPG, GIF, TIFF, EPS, PS) o bien grabando animaciones de la evolución temporal de las variables que intervienen en el problema (formatos MPEG y AVI) [24].

8. Simulación con ProCAST y Vulcan

En este capítulo se realiza la simulación con los programas ProCAST y Vulcan. Primero se han realizado doce simulaciones con ProCAST, con el fin de averiguar las condiciones óptimas de inyección y a continuación se ha realizado la simulación con Vulcan.

8.1. Simulación con ProCAST

En este apartado se realiza la simulación con ProCAST. Se han realizado un total de doce simulaciones, en las cuales se han modificado los parámetros: temperatura de colada, temperatura de molde y velocidad de inyección, con el fin de encontrar las condiciones óptimas de inyección.

8.1.1. Parámetros de entrada

Las tablas 8.1 a 8.12 muestran los parámetros empleados en cada una de las simulaciones. La modificación de cada uno de ellos supone la ejecución de una nueva simulación con ProCAST.

Tabla 8.1 Condiciones de contorno Simulación 1.

Simulación 1	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	200°C
Velocidad de inyección	0,2 m·s ⁻¹

Tabla 8.2 Condiciones de contorno Simulación 2.

Simulación 2	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	200°C
Velocidad de inyección	0,3 m·s ⁻¹

Tabla 8.3 Condiciones de contorno Simulación 3.

Simulación 3	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	200°C
Velocidad de inyección	0,4 m·s ⁻¹

Tabla 8.4 Condiciones de contorno Simulación 4.

Simulación 4	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	200°C
Velocidad de inyección	0,5 m·s ⁻¹

Tabla 8.5 Condiciones de contorno Simulación 5.

Simulación 5	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	250°C
Velocidad de inyección	0,2 m·s ⁻¹

Tabla 8.6 Condiciones de contorno Simulación 6.

Simulación 6	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	250°C
Velocidad de inyección	0,3 m·s ⁻¹

Tabla 8.7 Condiciones de contorno Simulación 7.

Simulación 7	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	250°C
Velocidad de inyección	0,4 m·s ⁻¹

Tabla 8.8 Condiciones de contorno Simulación 8.

Simulación 8	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	250°C
Velocidad de inyección	0,5 m·s ⁻¹

Tabla 8.9 Condiciones de contorno Simulación 9.

Simulación 9	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	300°C
Velocidad de inyección	0,2 m·s ⁻¹

Tabla 8.10 Condiciones de contorno Simulación 10.

Simulación 10	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	300°C
Velocidad de inyección	0,3 m·s ⁻¹

Tabla 8.11 Condiciones de contorno Simulación 11.

Simulación 11	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	300°C
Velocidad de inyección	0,4 m·s ⁻¹

Tabla 8.12 Condiciones de contorno Simulación 12.

Simulación 12	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	300°C
Velocidad de inyección	0,5 m·s ⁻¹

8.1.2. Simulaciones

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones, mediante imágenes extraídas del módulo ViewCAST.

8.1.2.1. Simulación 1

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 200°C de temperatura de molde y 0,2 m·s⁻¹ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

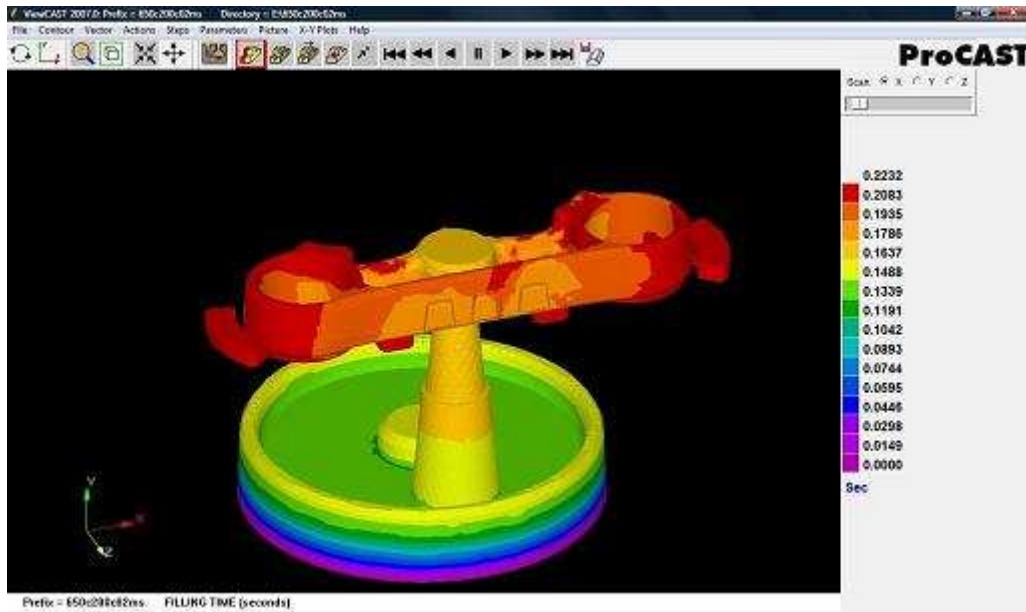


Figura 8.1 Mapa del tiempo de llenado.

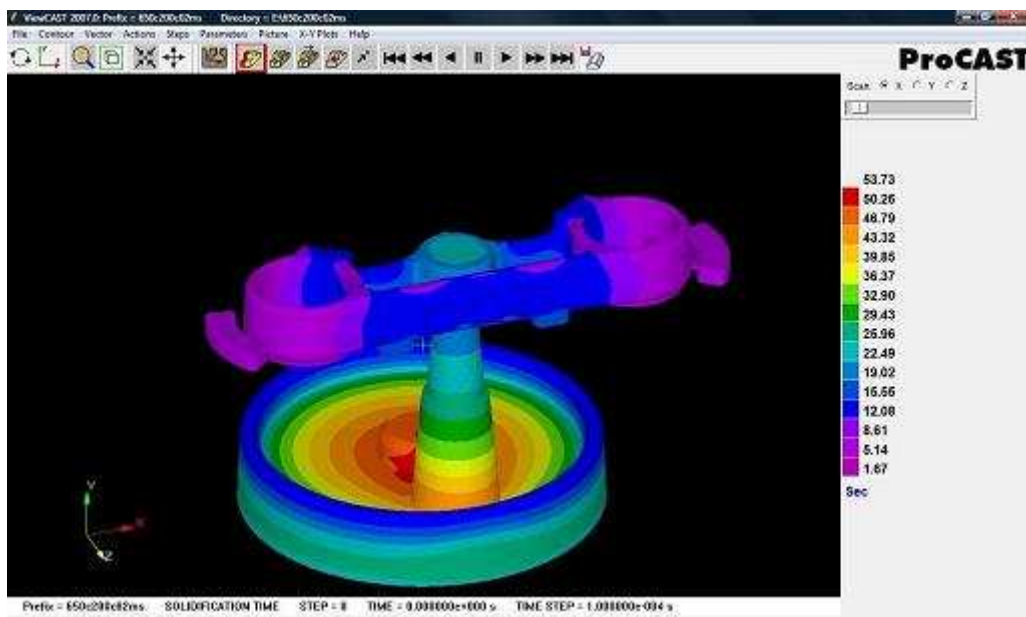


Figura 8.2 Mapa del tiempo de solidificación.

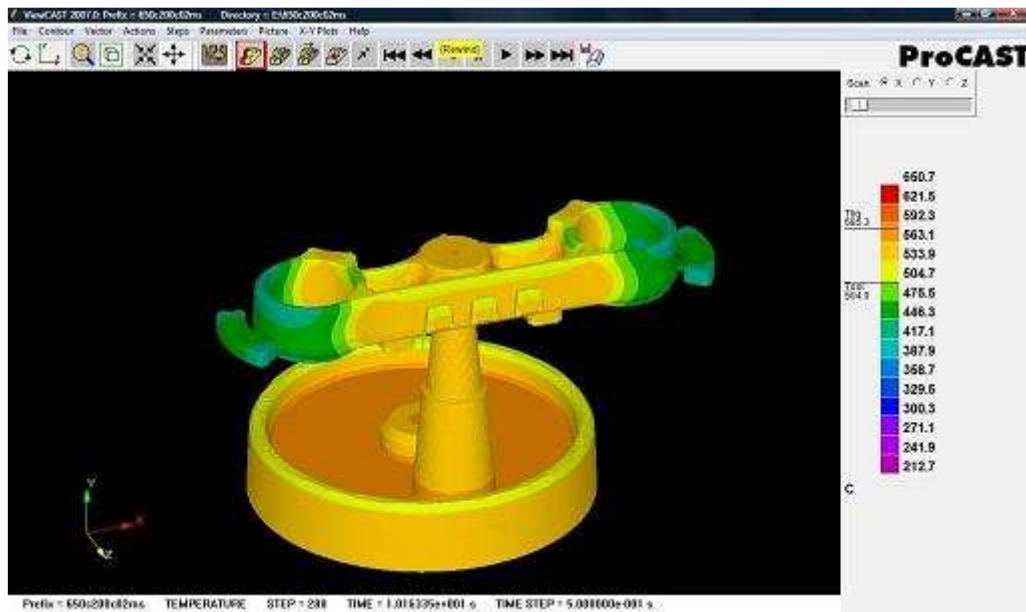


Figura 8.3 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

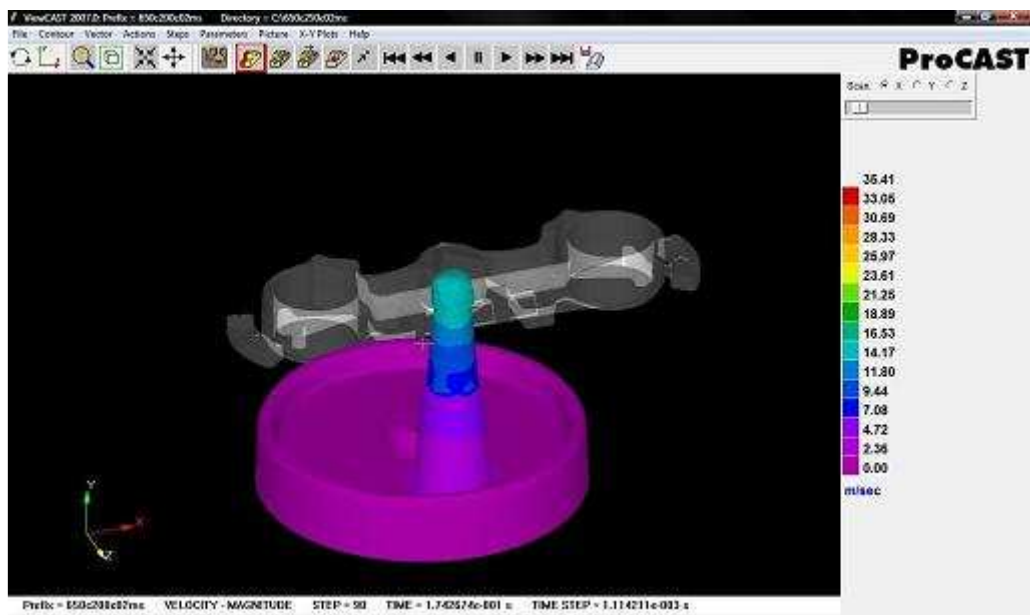


Figura 8.4 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

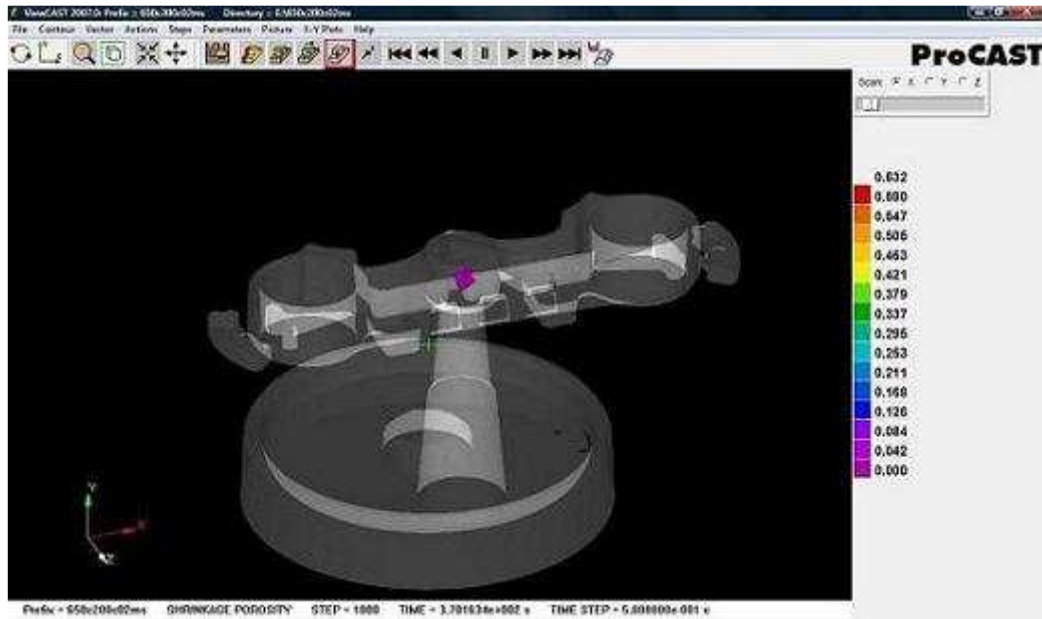


Figura 8.5 Mapa de la porosidad.

8.1.2.2. Simulación 2

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 200°C de temperatura de molde y $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

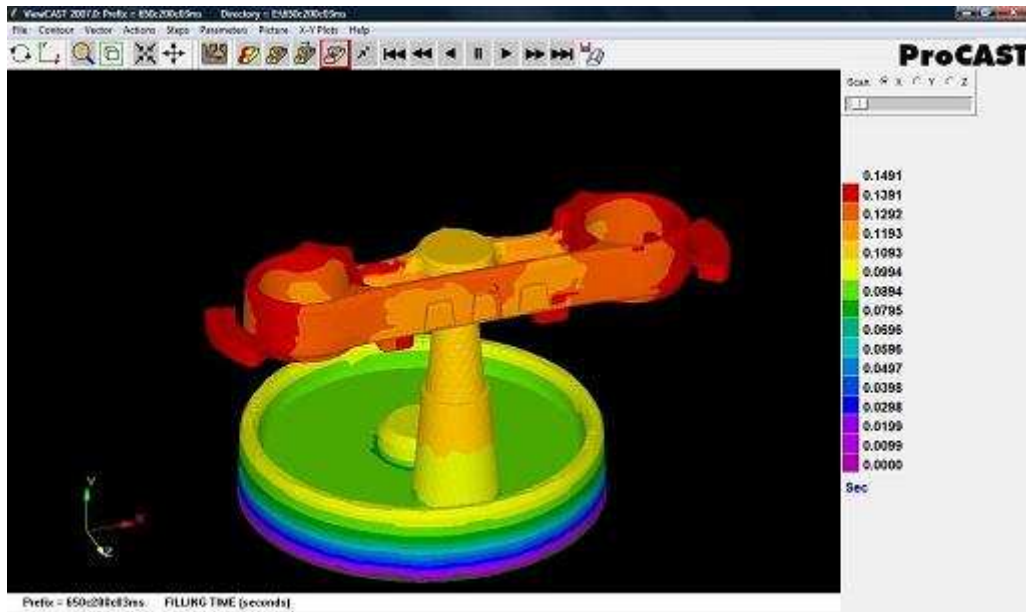


Figura 8.6 Mapa del tiempo de llenado.

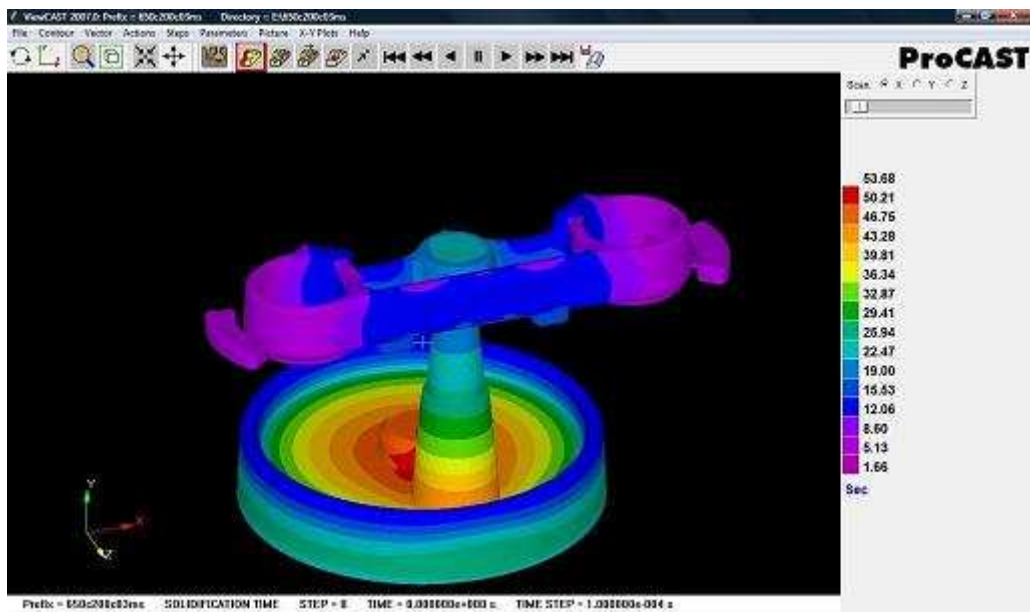


Figura 8.7 Mapa del tiempo de solidificación.

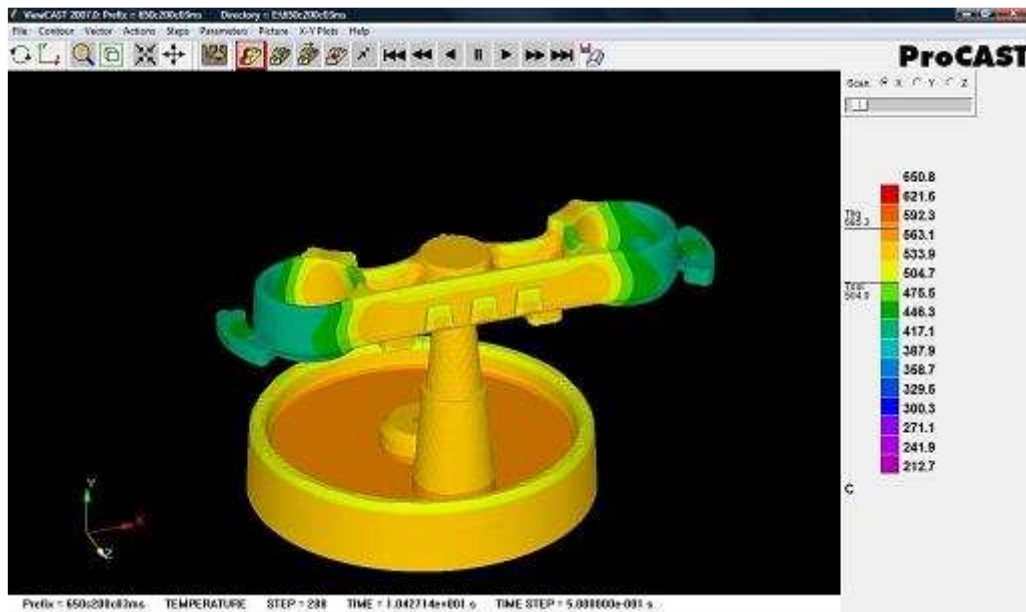


Figura 8.8 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

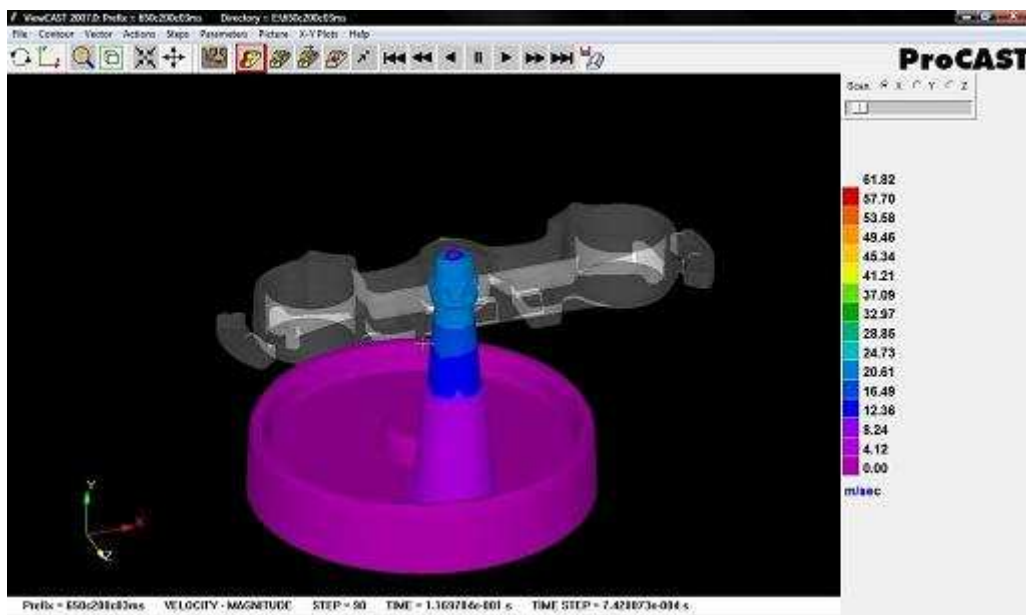


Figura 8.9 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

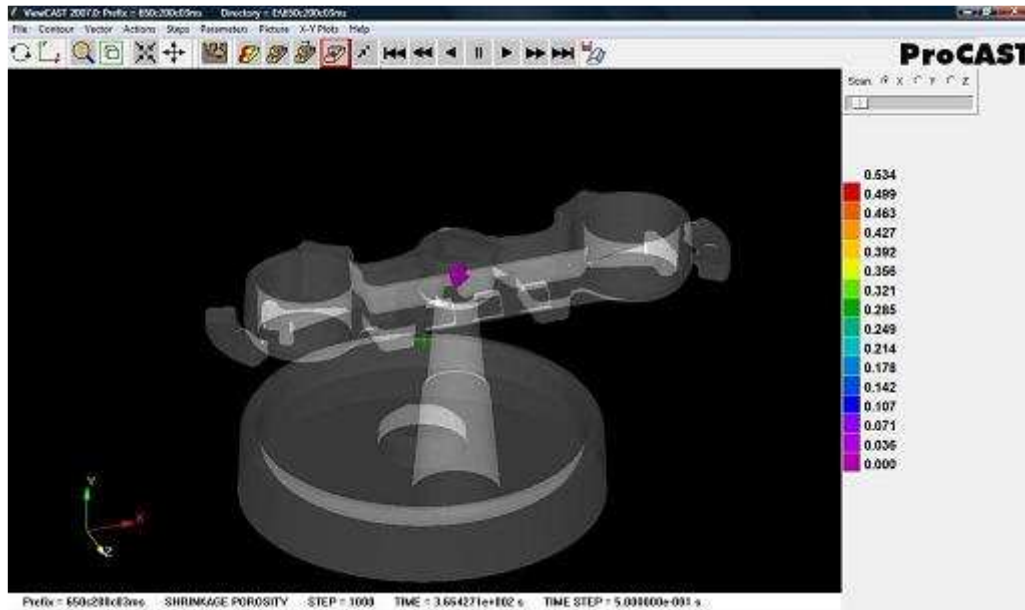


Figura 8.10 Mapa de la porosidad.

8.1.2.3. Simulación 3

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 200°C de temperatura de molde y 0,4 m·s⁻¹ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

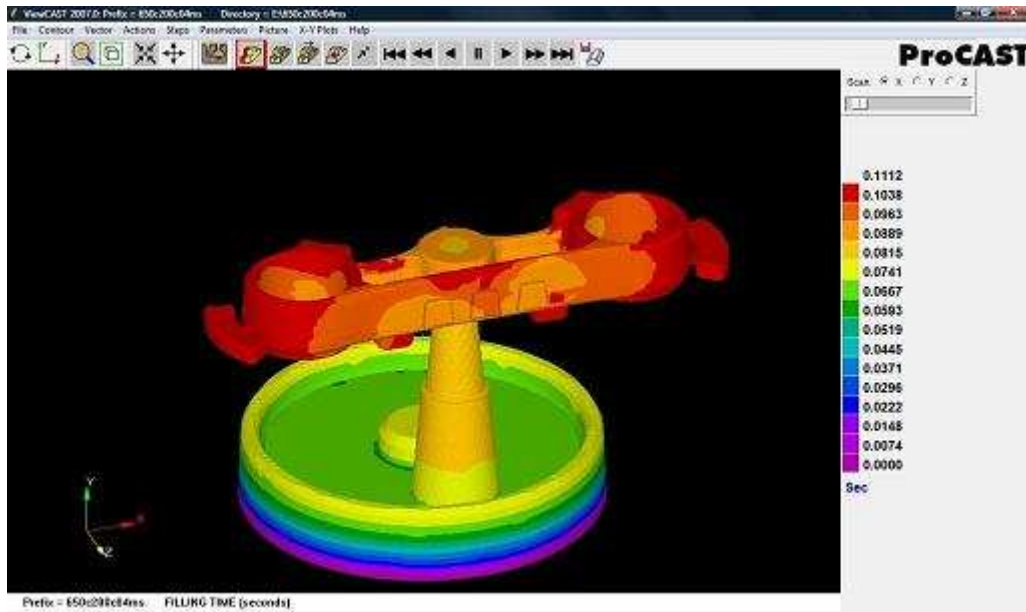


Figura 8.11 Mapa del tiempo de llenado.

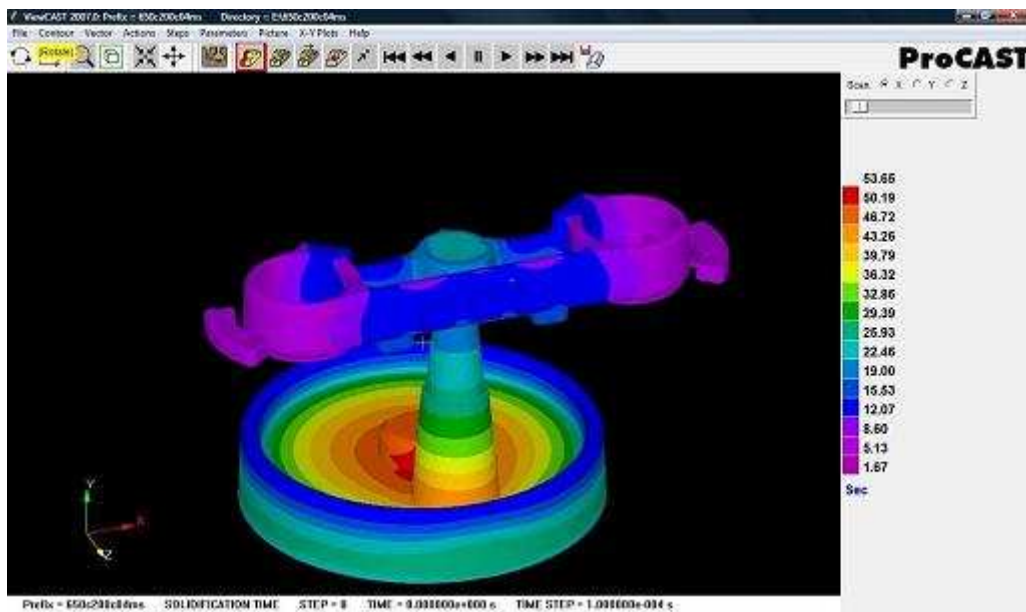


Figura 8.12 Mapa del tiempo de solidificación.

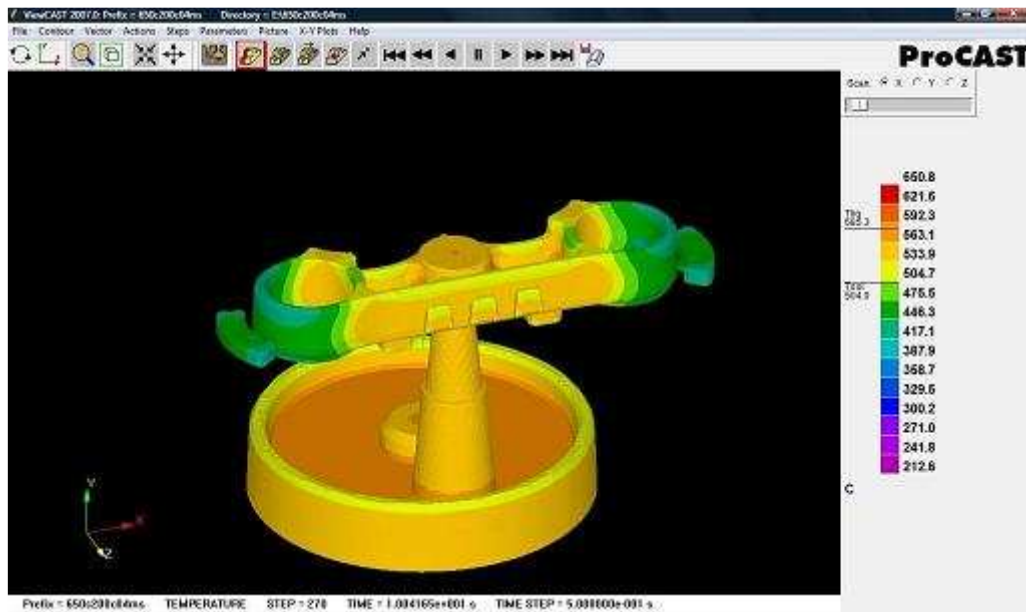


Figura 8.13 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

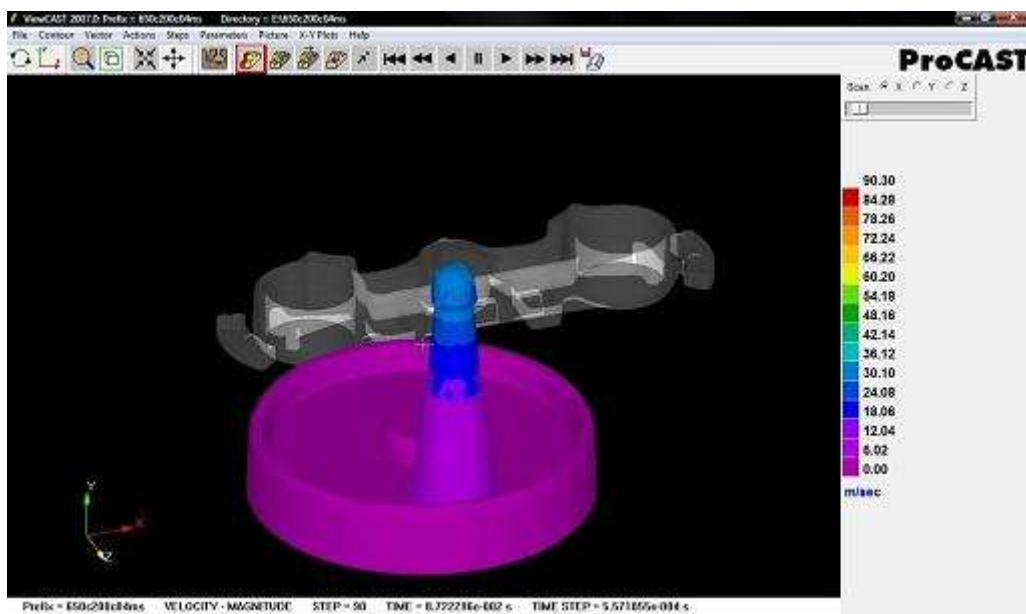


Figura 8.14 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

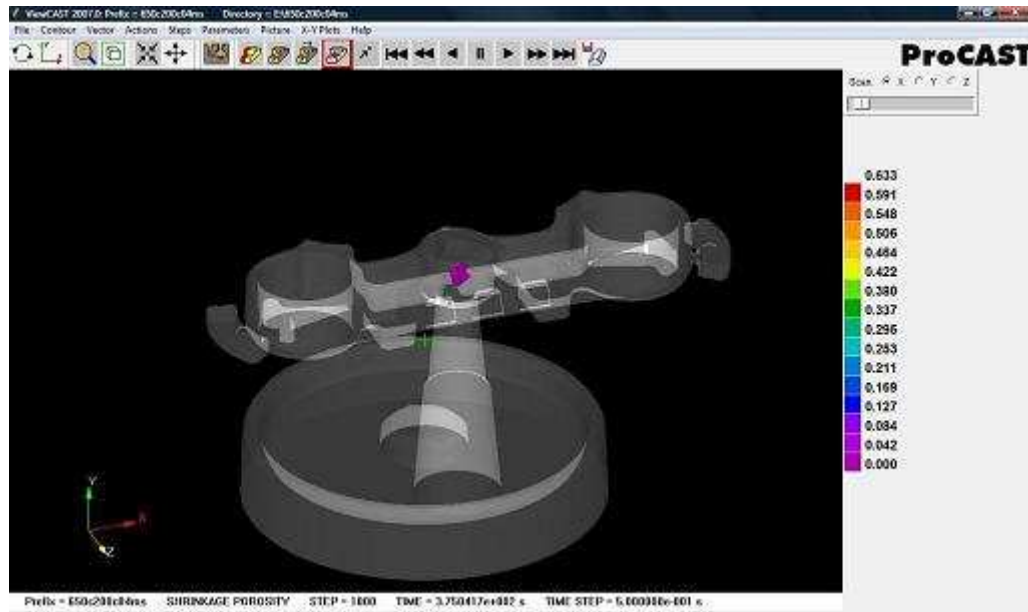


Figura 8.15 Mapa de la porosidad.

8.1.2.4. Simulación 4

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 200°C de temperatura de molde y $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

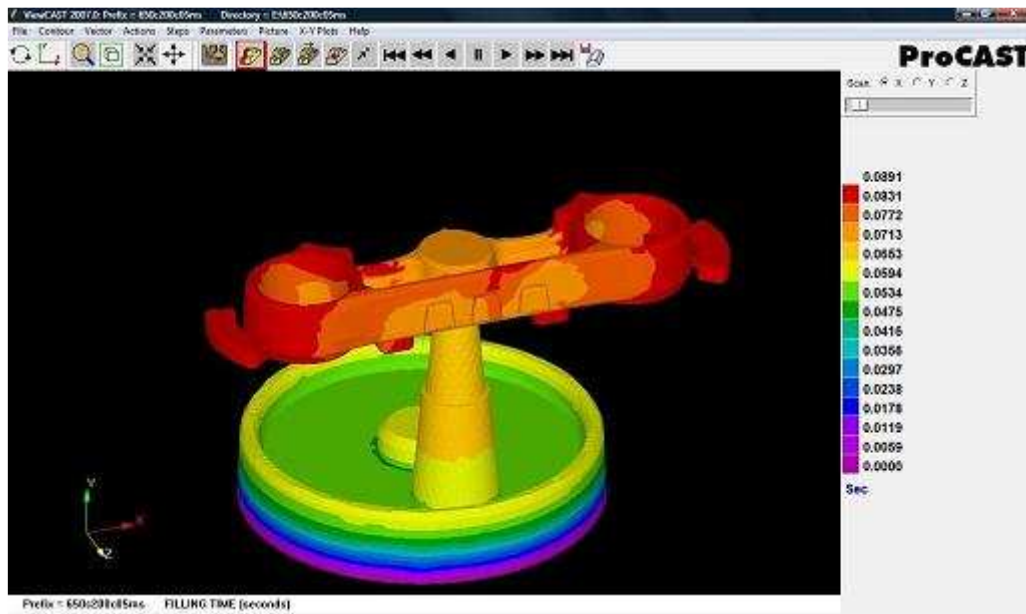


Figura 8.16 Mapa del tiempo de llenado.

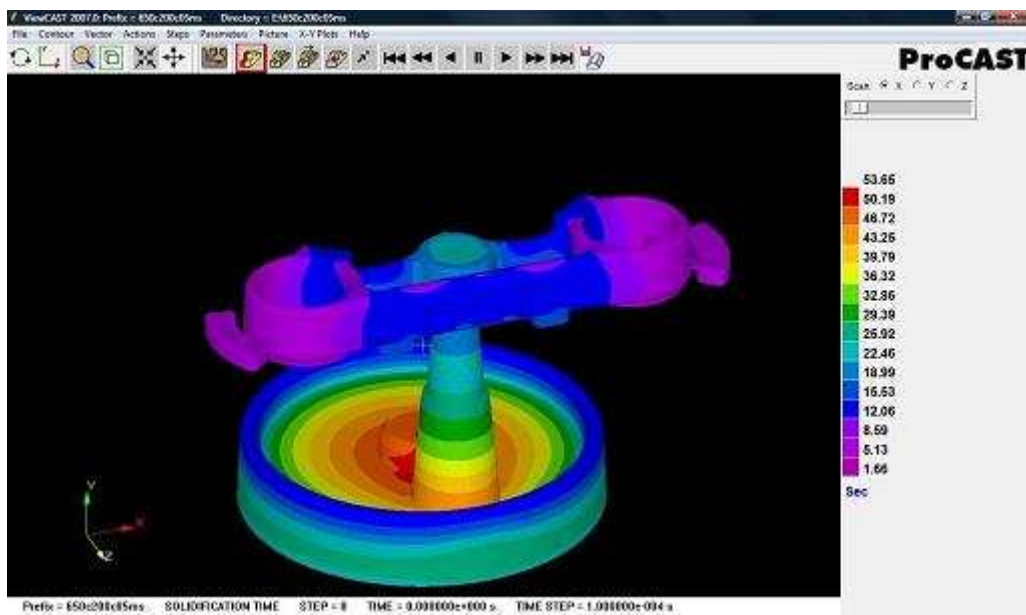


Figura 8.17 Mapa del tiempo de solidificación.

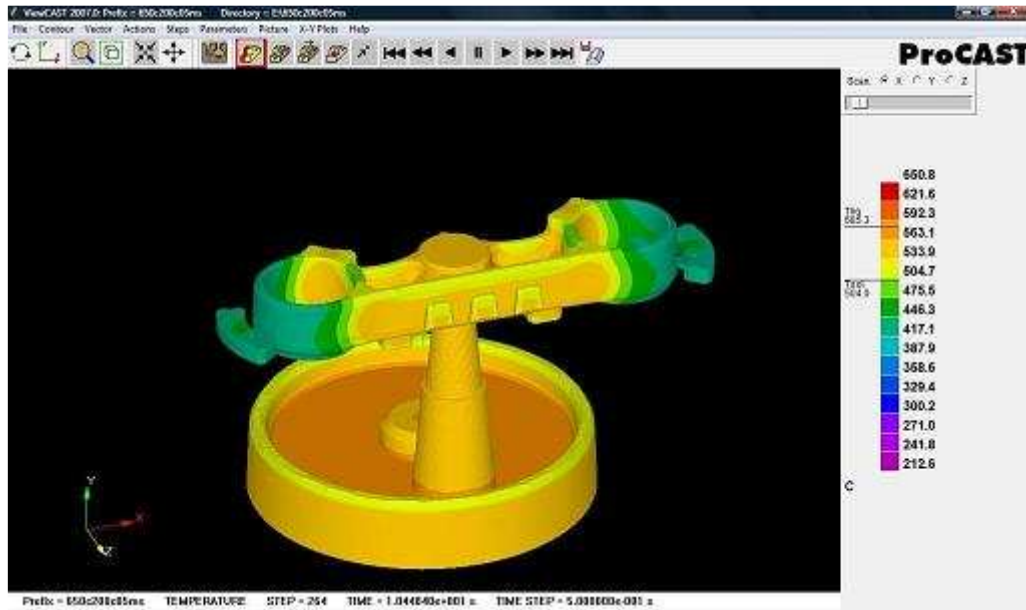


Figura 8.18 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

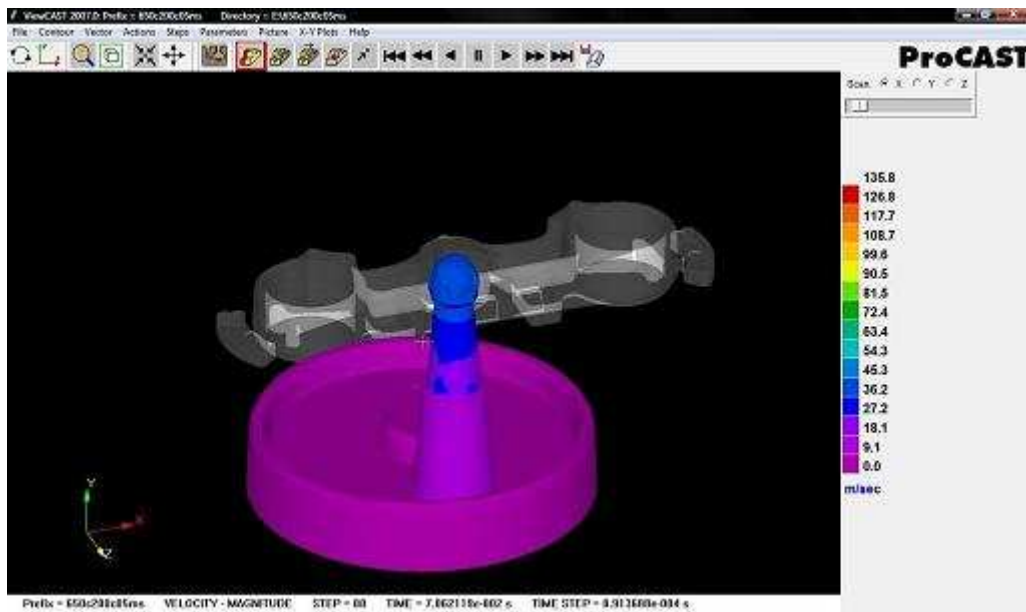


Figura 8.19 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

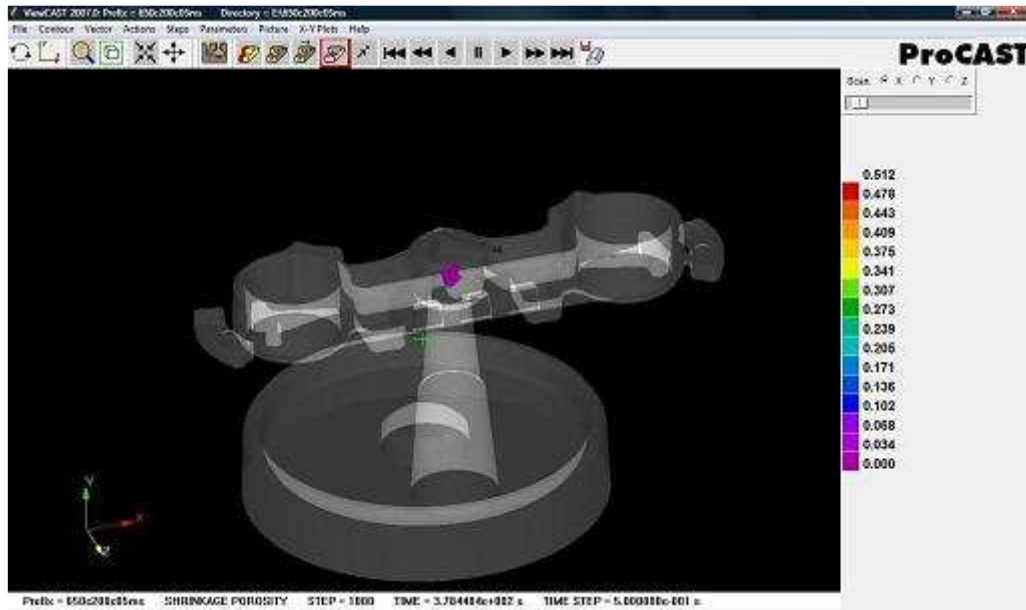


Figura 8.20 Mapa de la porosidad.

8.1.2.5. Simulación 5

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 250°C de temperatura de molde y 0,2 m·s⁻¹ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

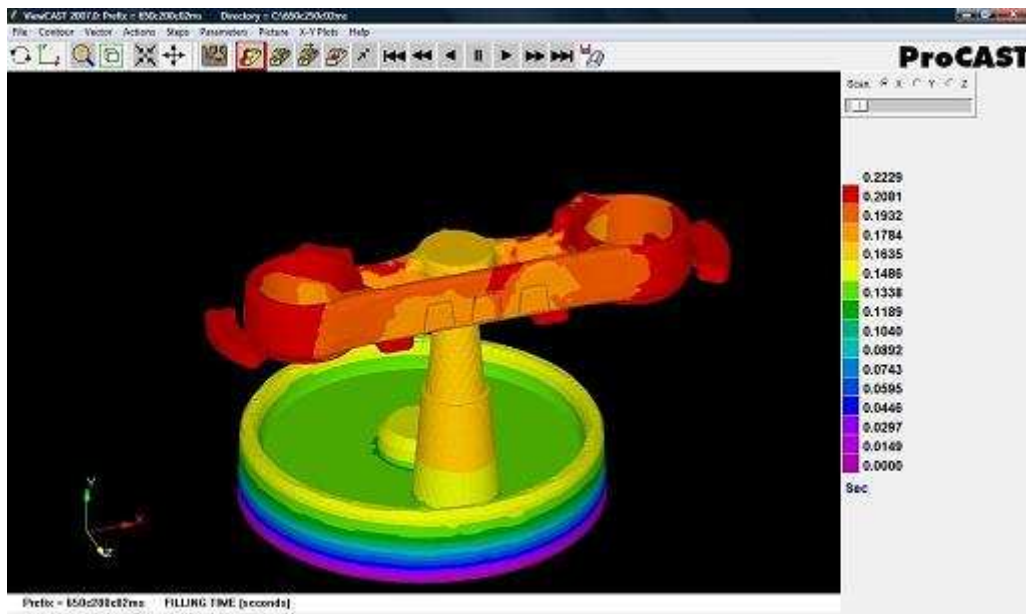


Figura 8.21 Mapa del tiempo de llenado.

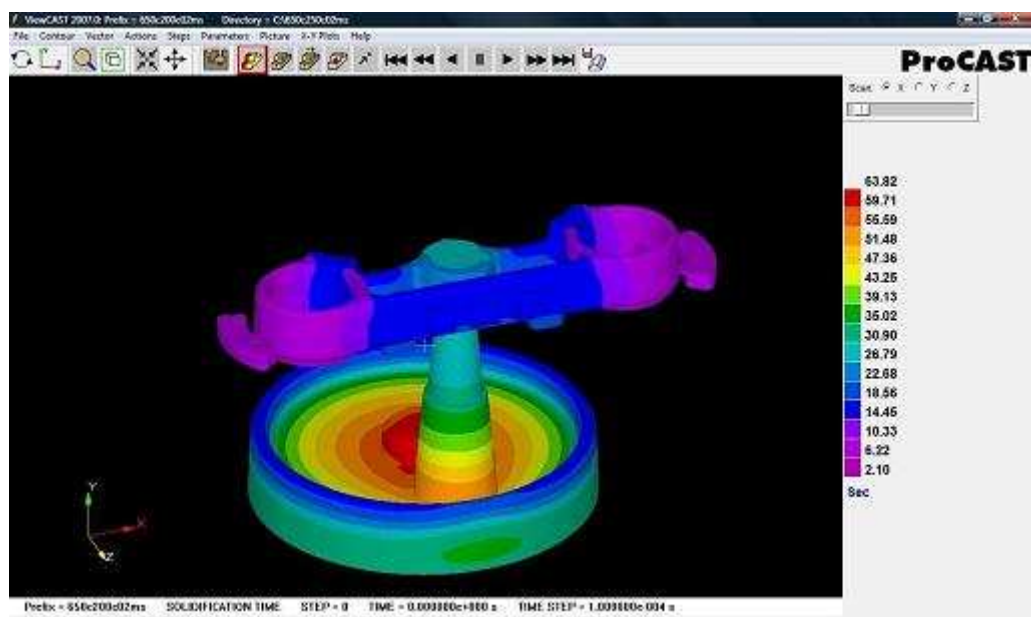


Figura 8.22 Mapa del tiempo de solidificación.

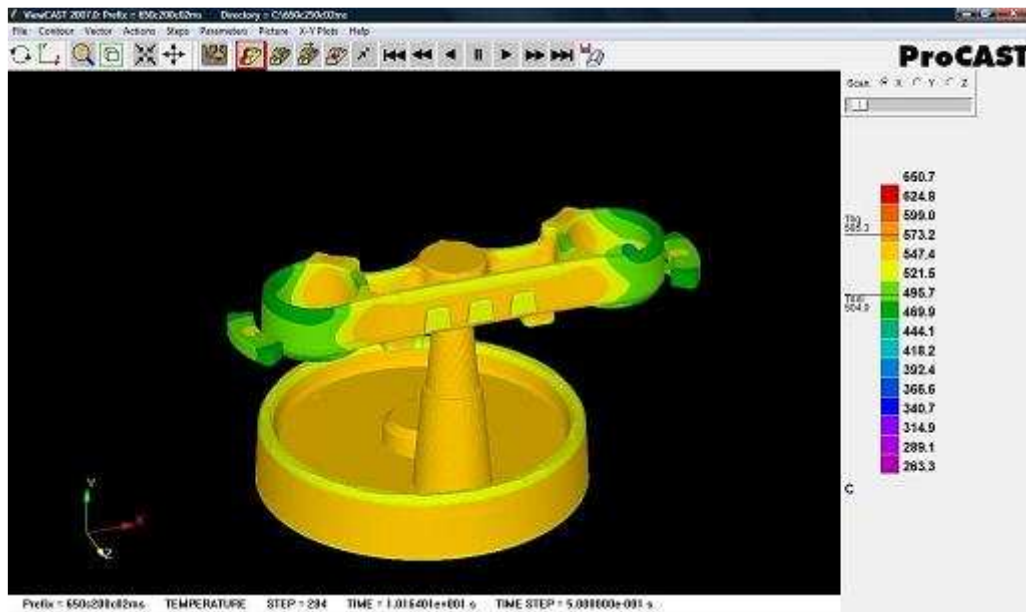


Figura 8.23 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

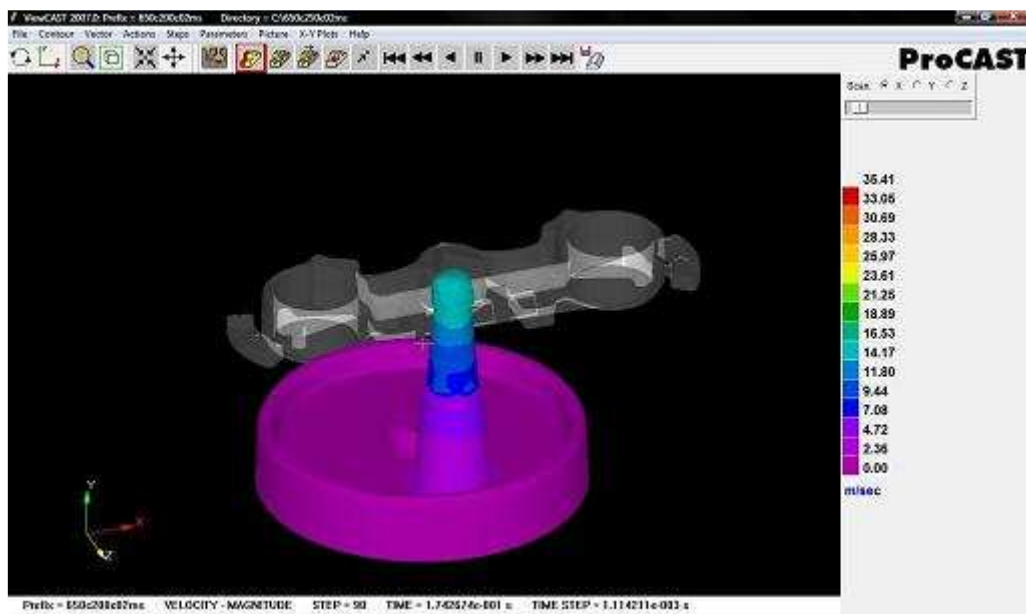


Figura 8.24 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

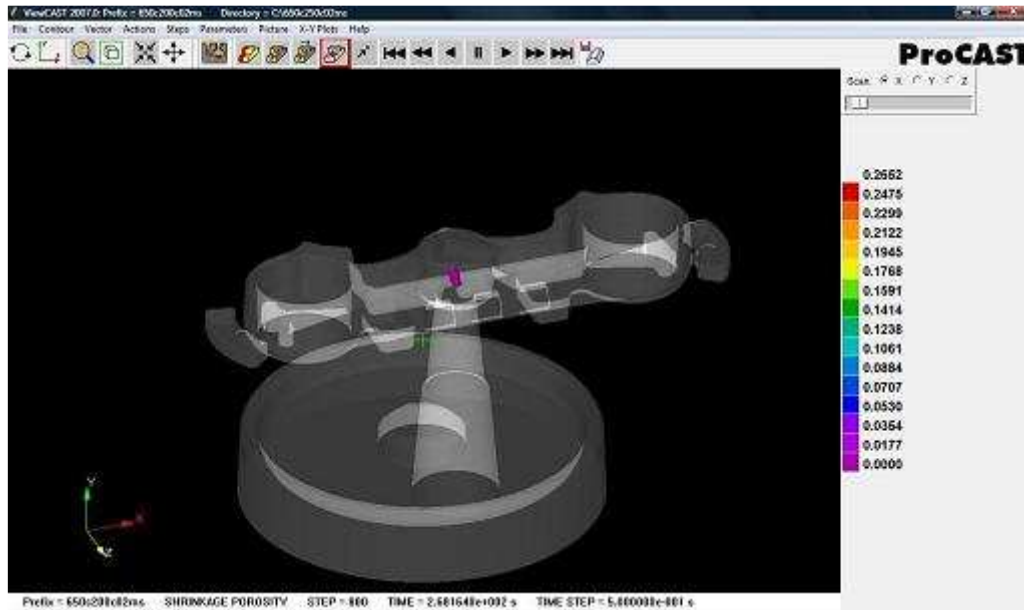


Figura 8.25 Mapa de la porosidad.

8.1.2.6. Simulación 6

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 250°C de temperatura de molde y $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

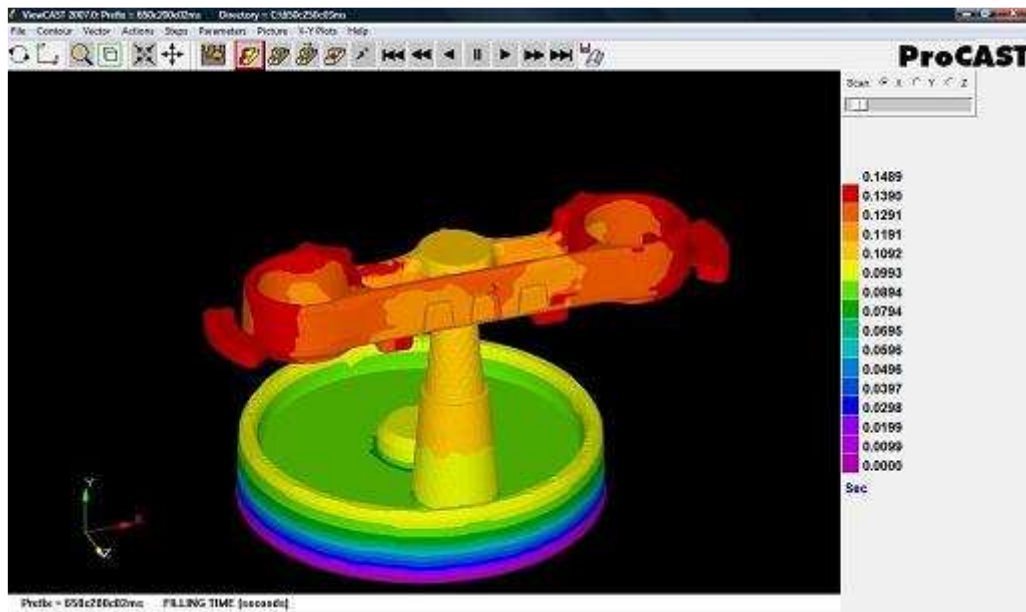


Figura 8.26 Mapa del tiempo de llenado.

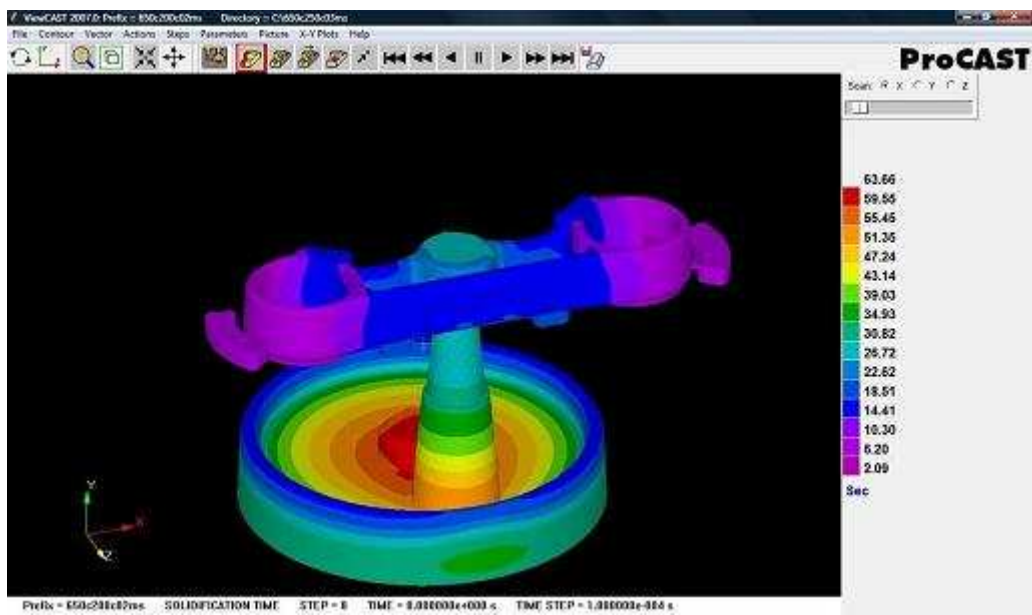


Figura 8.27 Mapa del tiempo de solidificación.

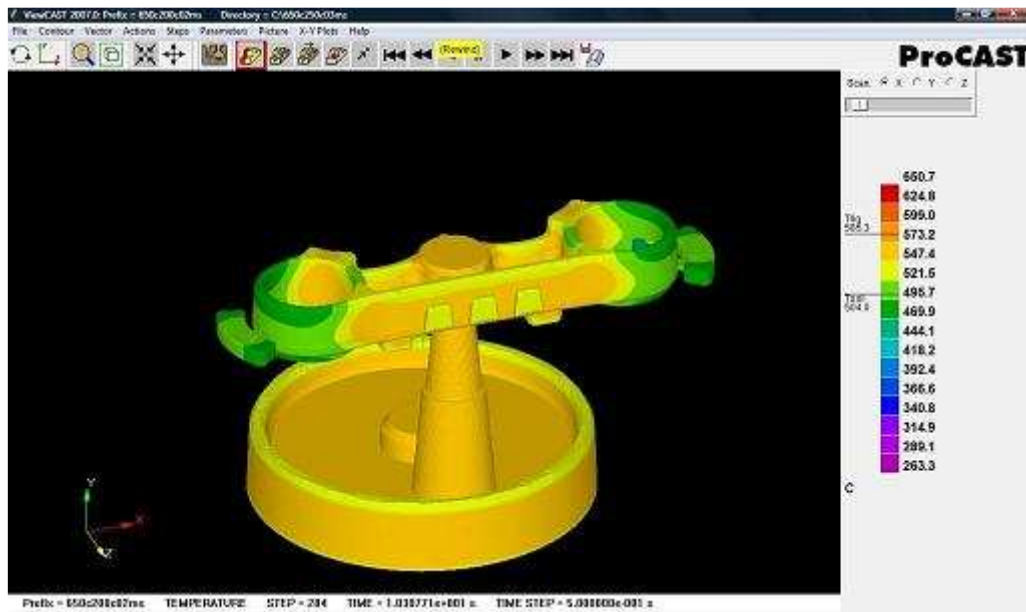


Figura 8.28 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

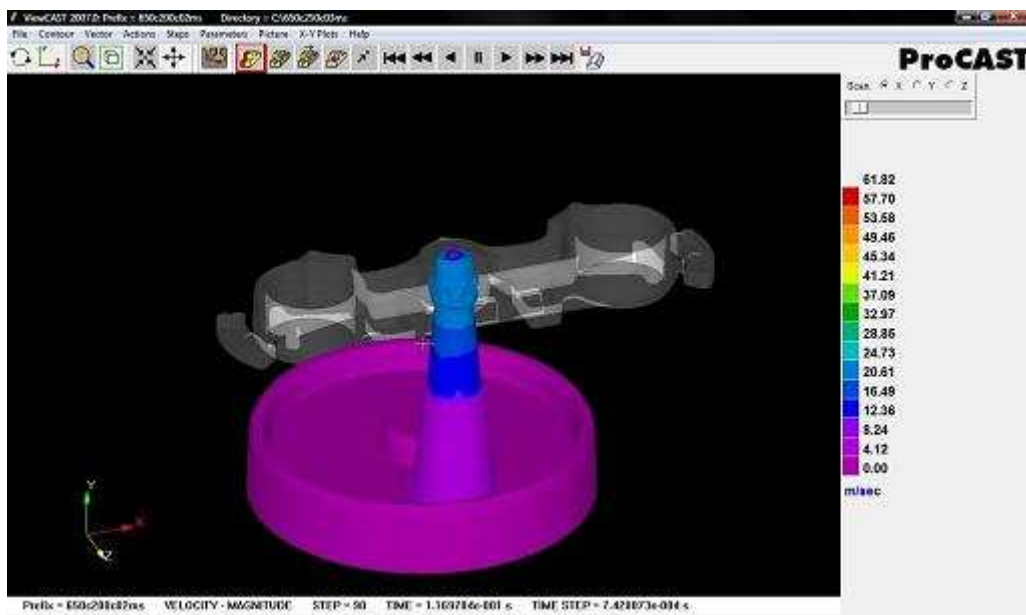


Figura 8.29 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

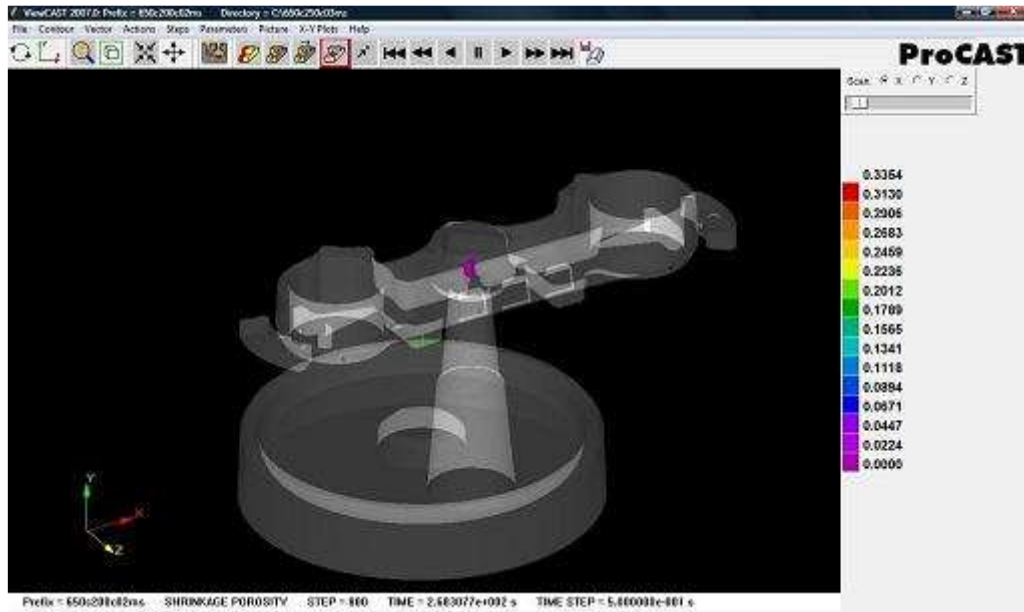


Figura 8.30 Mapa de la porosidad.

8.1.2.7. Simulación 7

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 250°C de temperatura de molde y $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

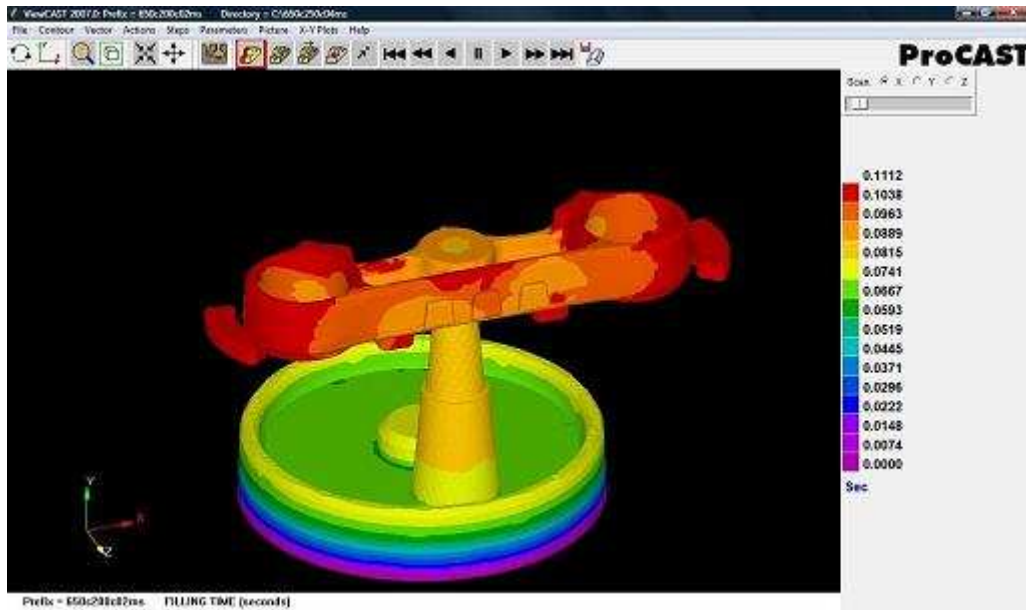


Figura 8.31 Mapa del tiempo de llenado.

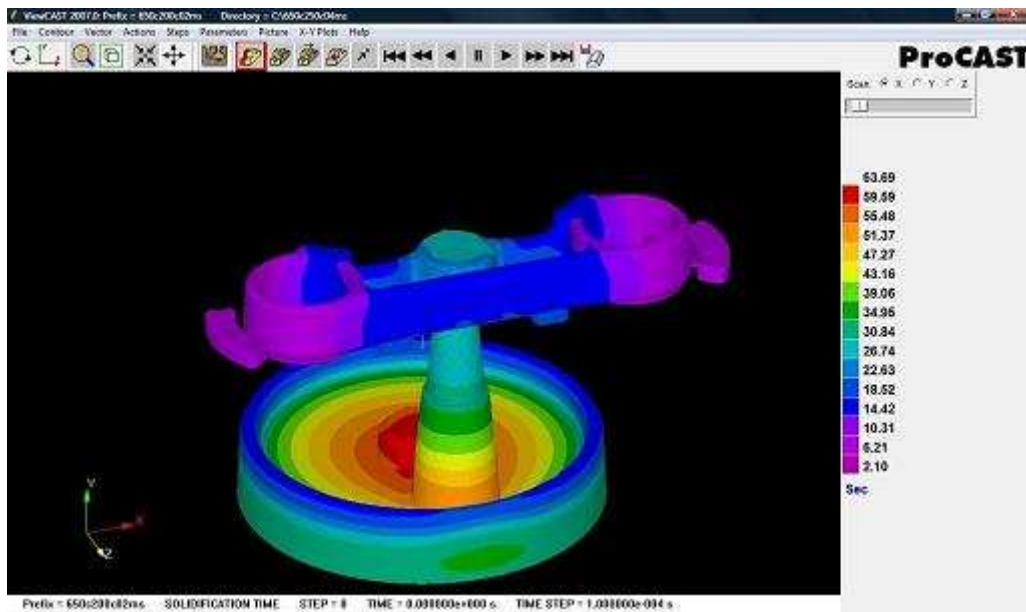


Figura 8.32 Mapa del tiempo de solidificación.

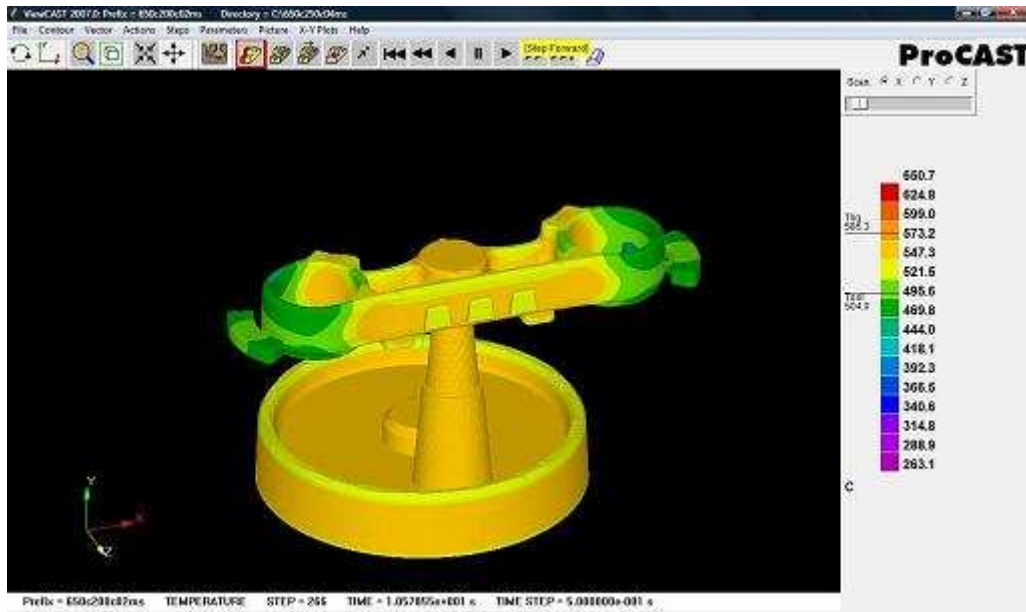


Figura 8.33 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

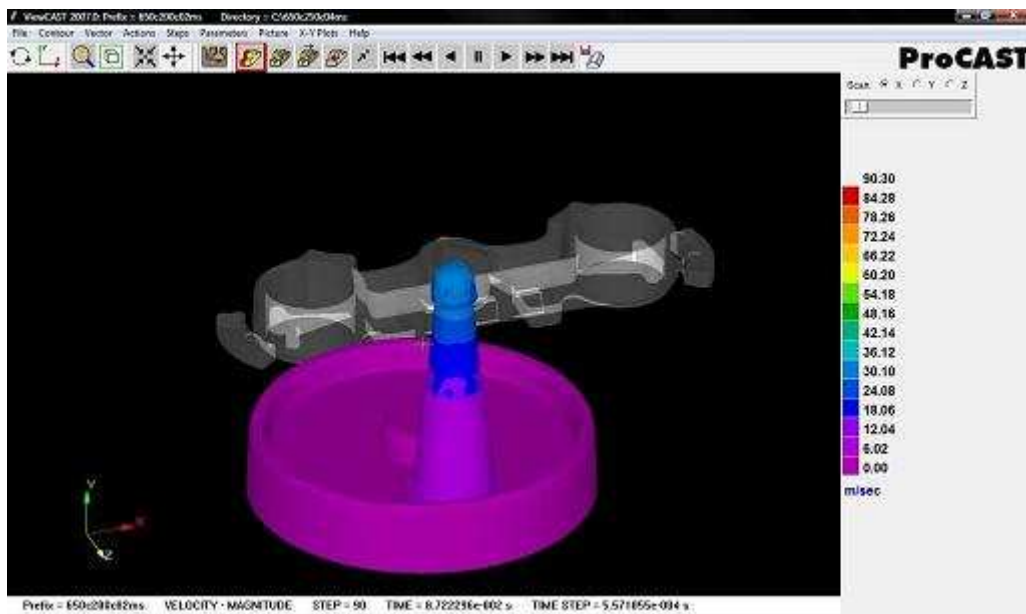


Figura 8.34 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

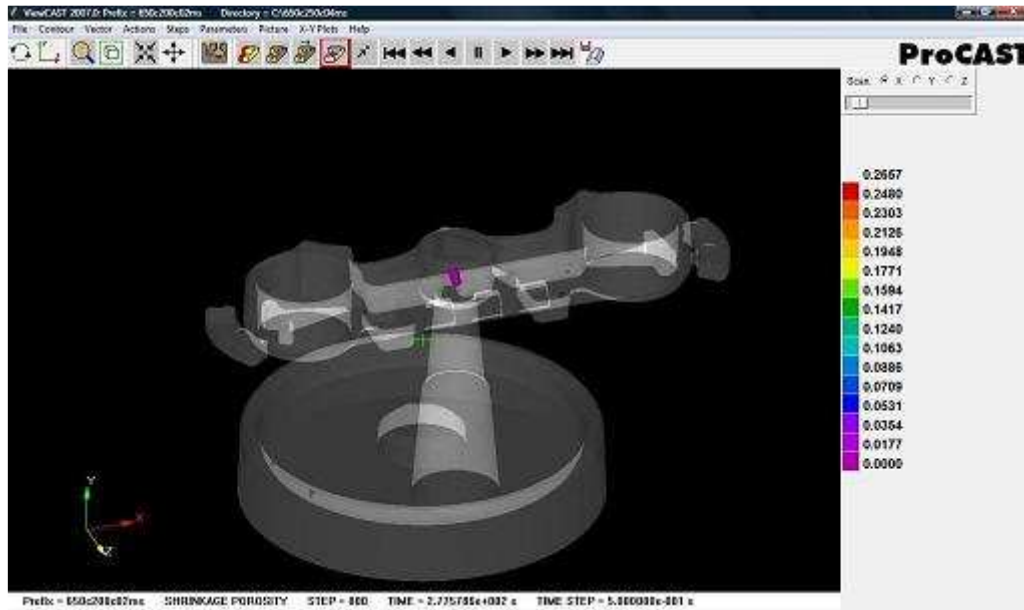


Figura 8.35 Mapa de la porosidad.

8.1.2.8. Simulación 8

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 250°C de temperatura de molde y $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

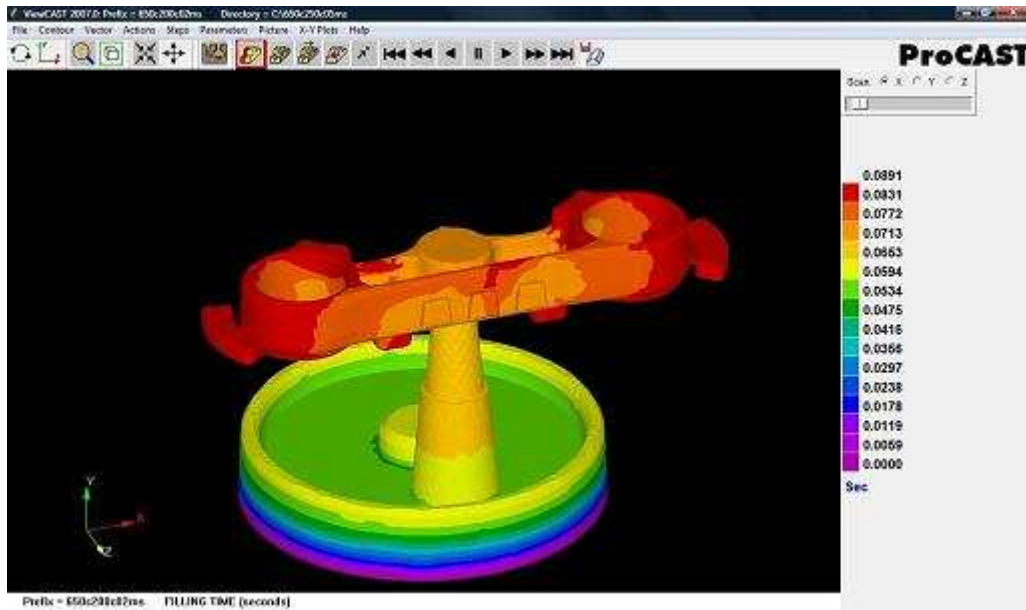


Figura 8.36 Mapa del tiempo de llenado.

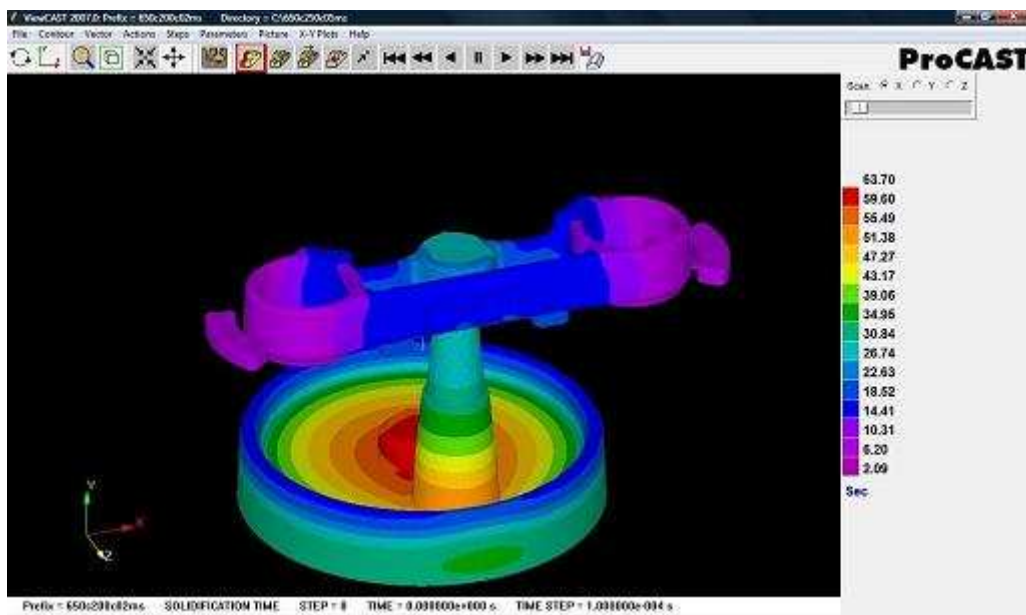


Figura 8.37 Mapa del tiempo de solidificación.

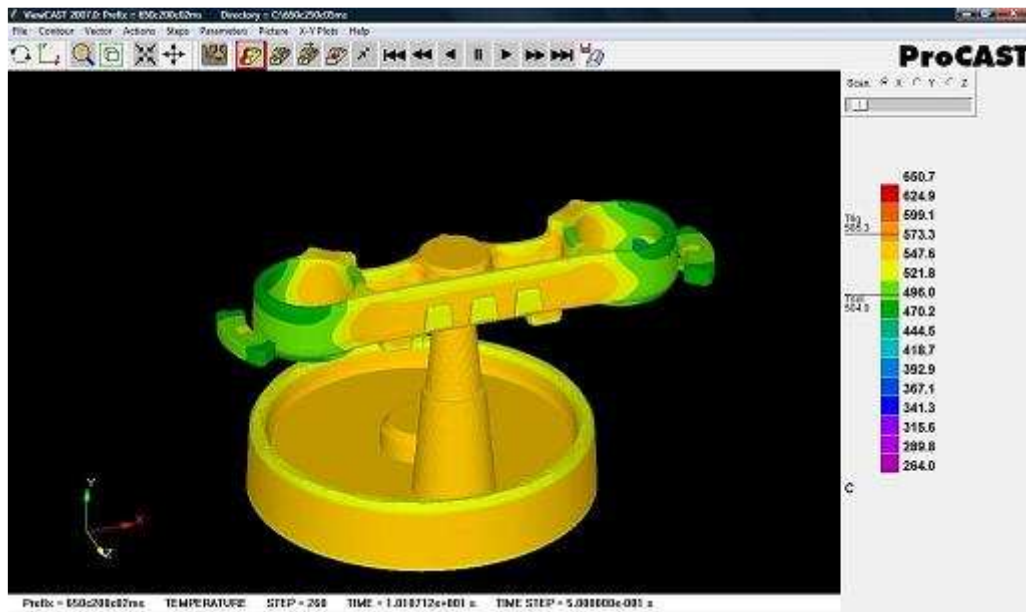


Figura 8.38 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

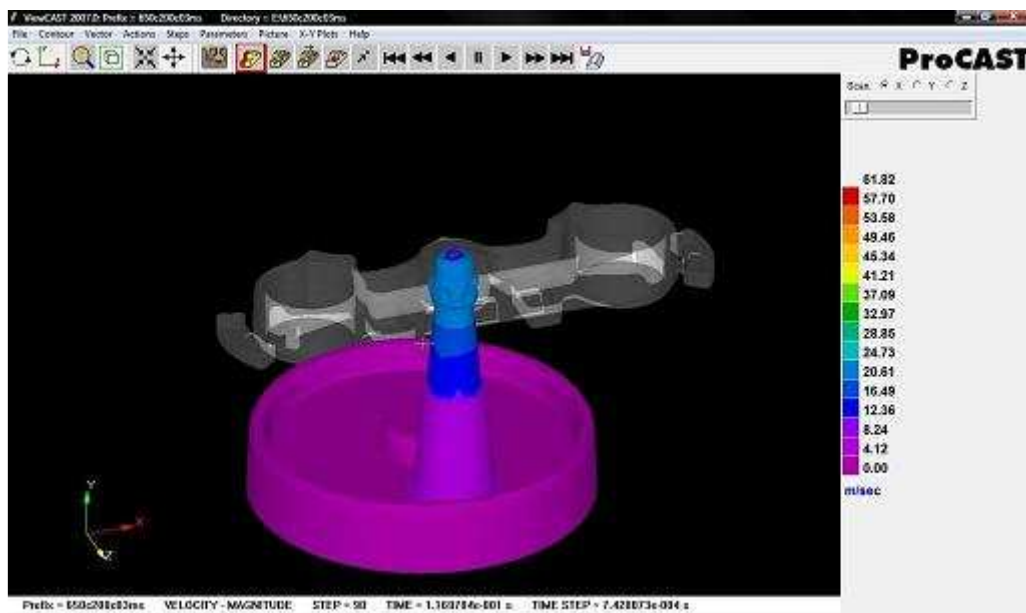


Figura 8.39 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

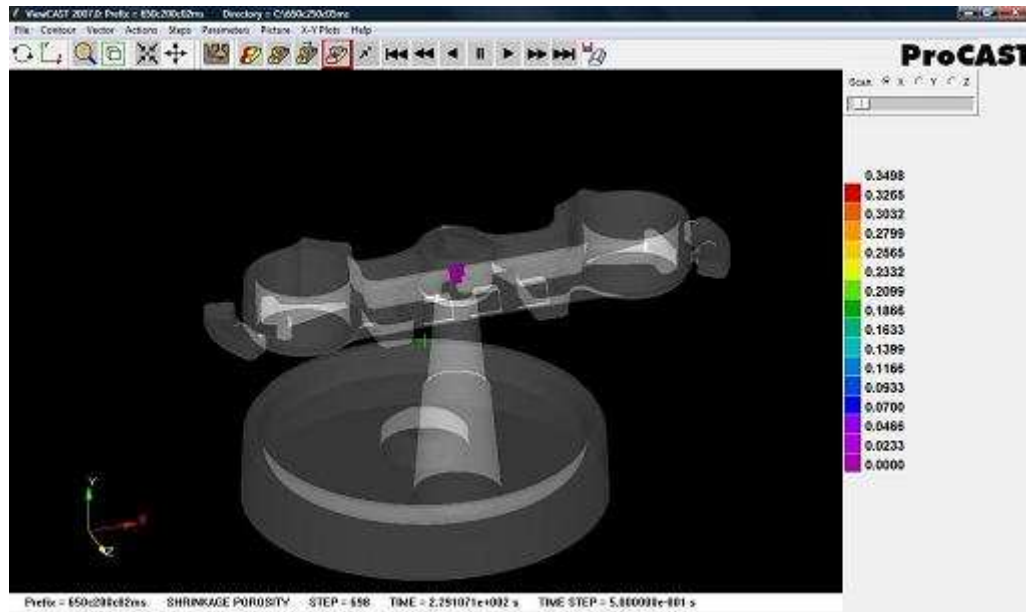


Figura 8.40 Mapa de la porosidad.

8.1.2.9. Simulación 9

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 300°C de temperatura de molde y $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

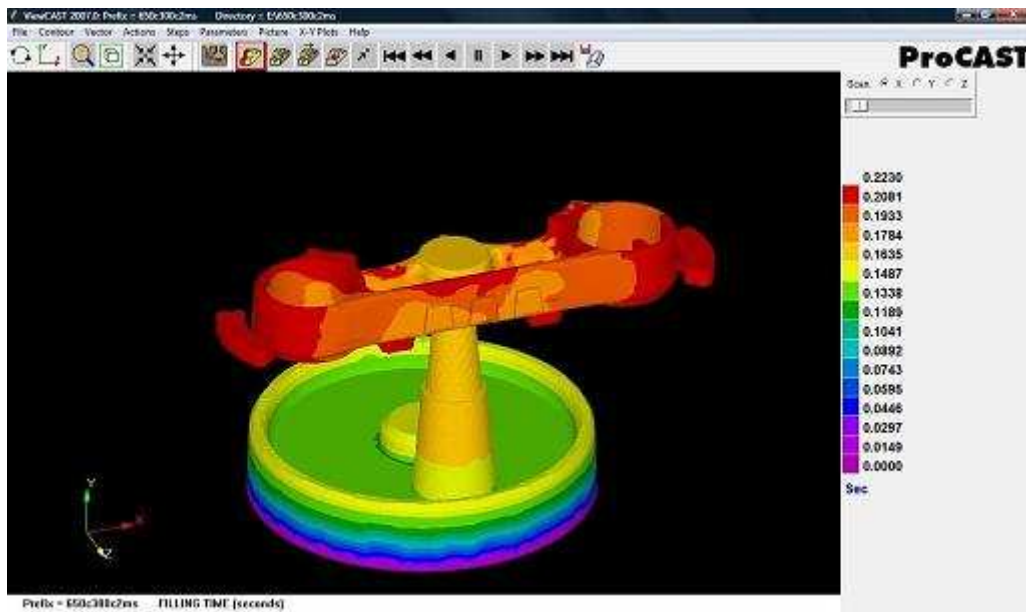


Figura 8.41 Mapa del tiempo de llenado.

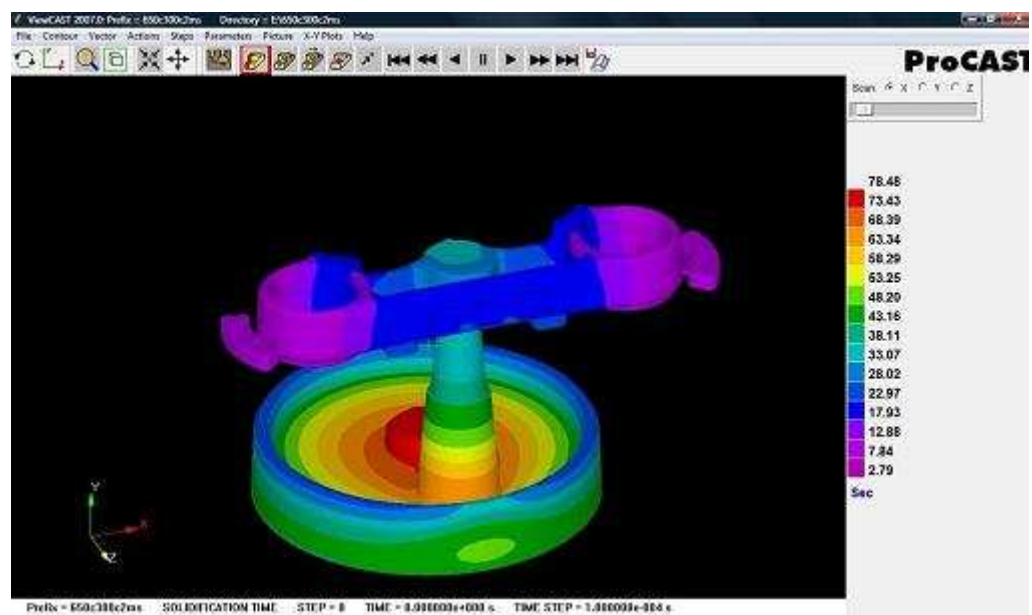


Figura 8.42 Mapa del tiempo de solidificación.

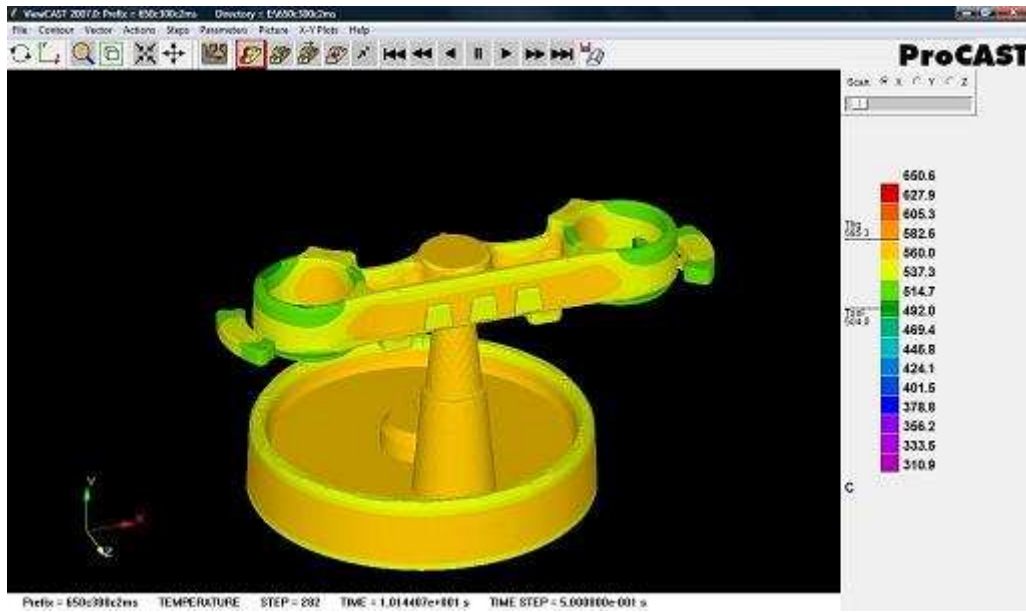


Figura 8.43 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

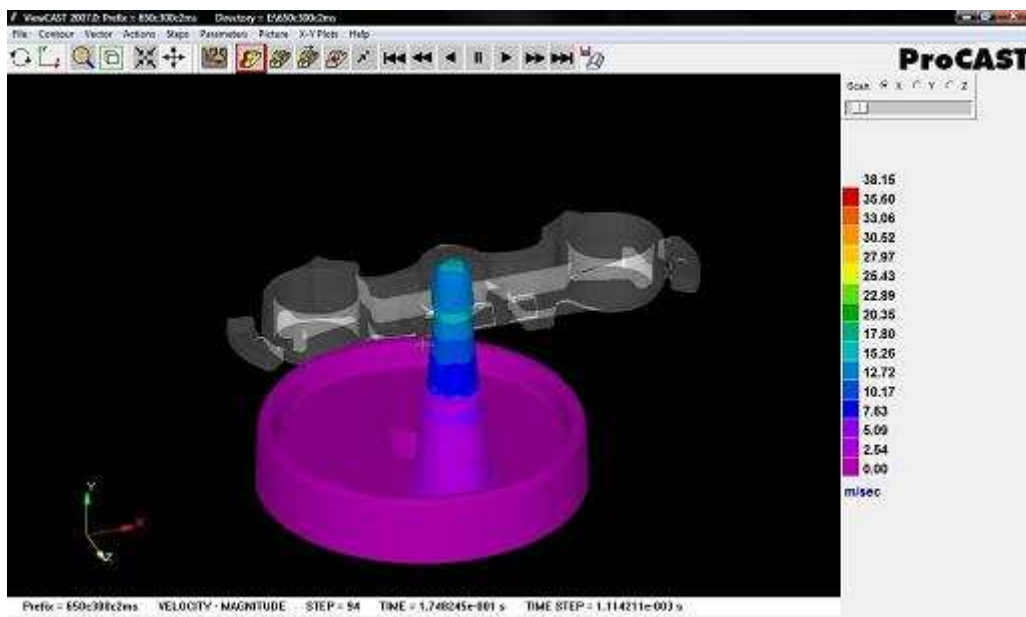


Figura 8.44 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

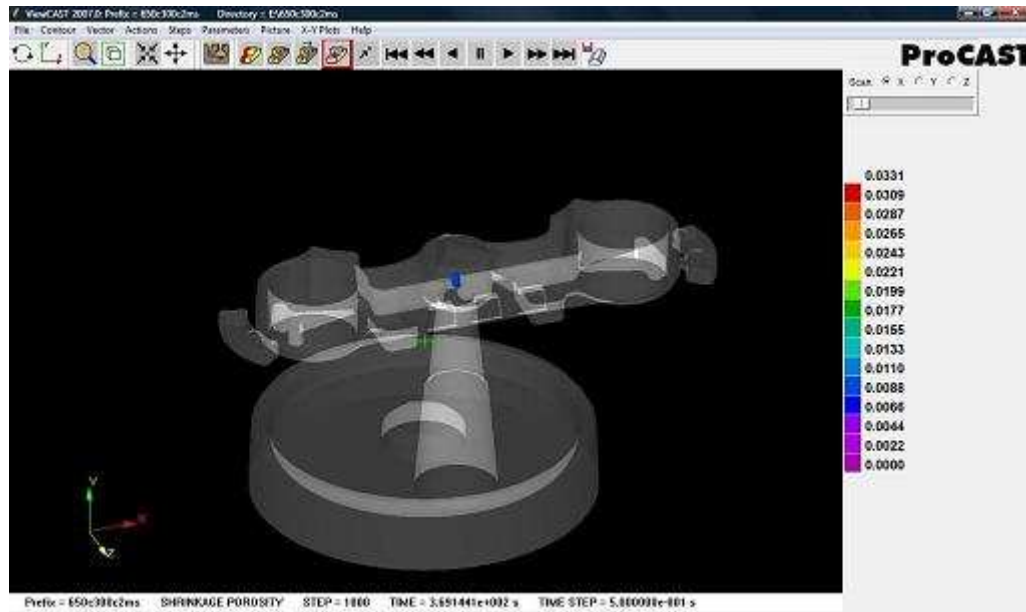


Figura 8.45 Mapa de la porosidad.

8.1.2.10. Simulación 10

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 300°C de temperatura de molde y $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

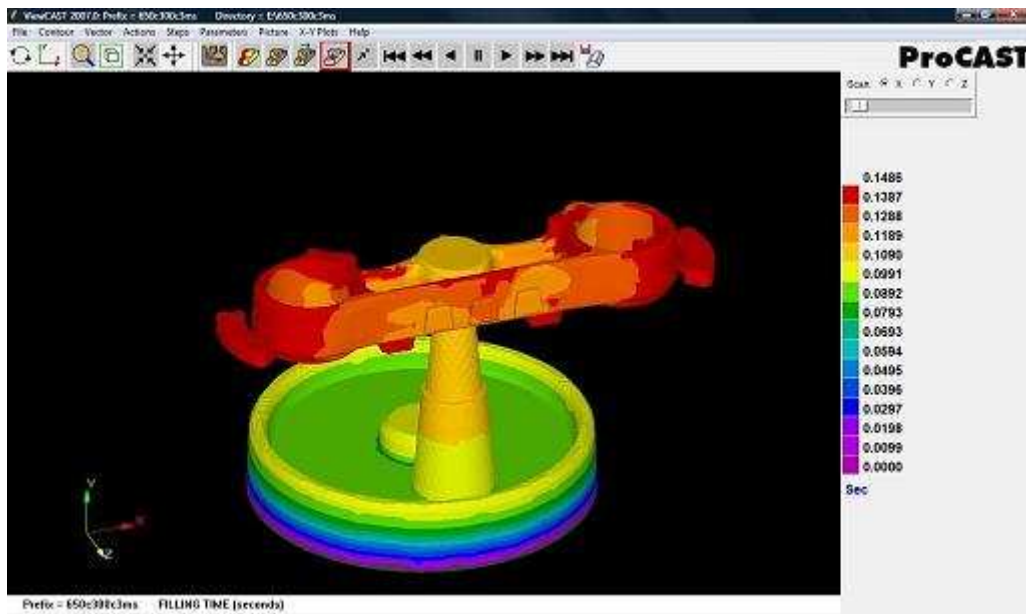


Figura 8.46 Mapa del tiempo de llenado.

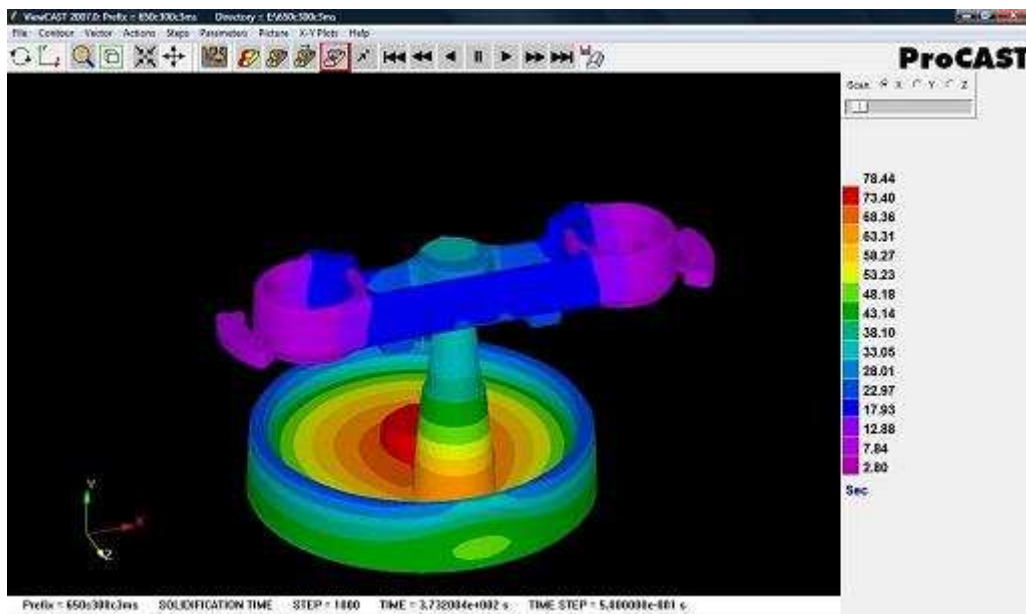


Figura 8.47 Mapa del tiempo de solidificación.



Figura 8.48 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

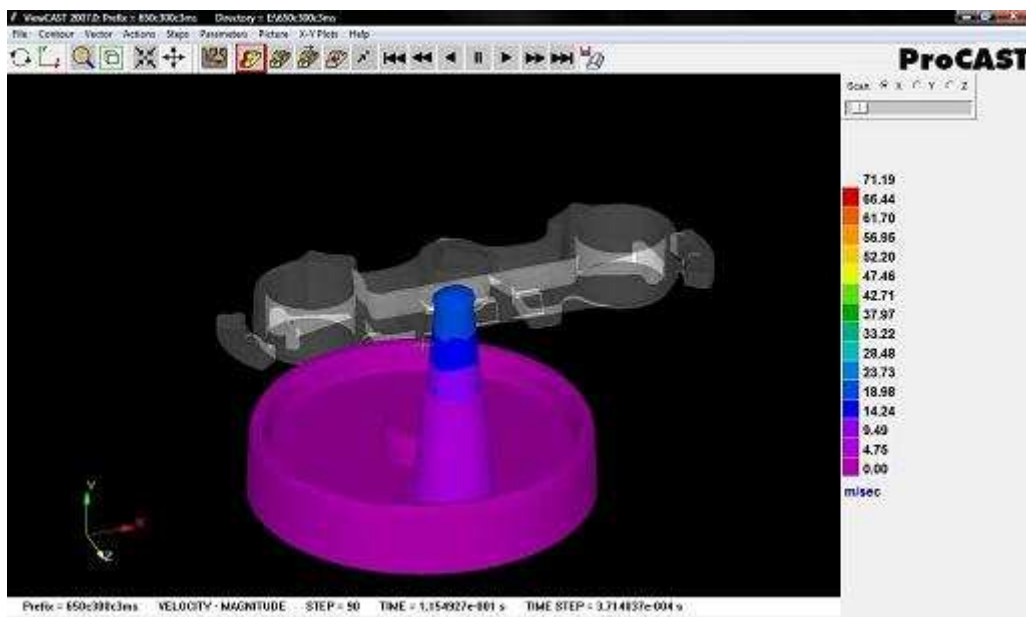


Figura 8.49 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

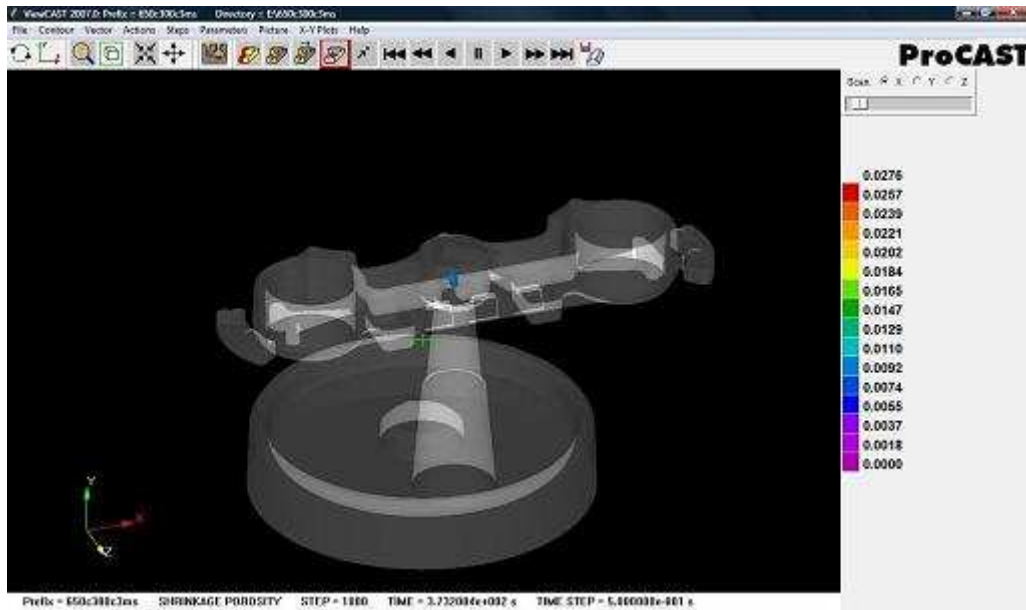


Figura 8.50 Mapa de la porosidad.

8.1.2.11. Simulación 11

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 300°C de temperatura de molde y 0,4 m·s⁻¹ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

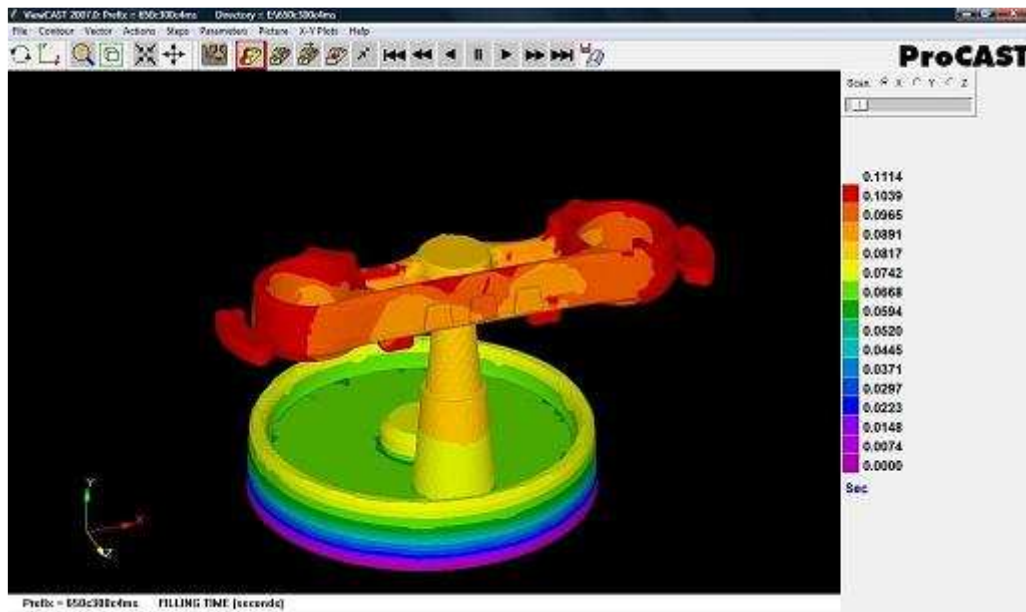


Figura 8.51 Mapa del tiempo de llenado.

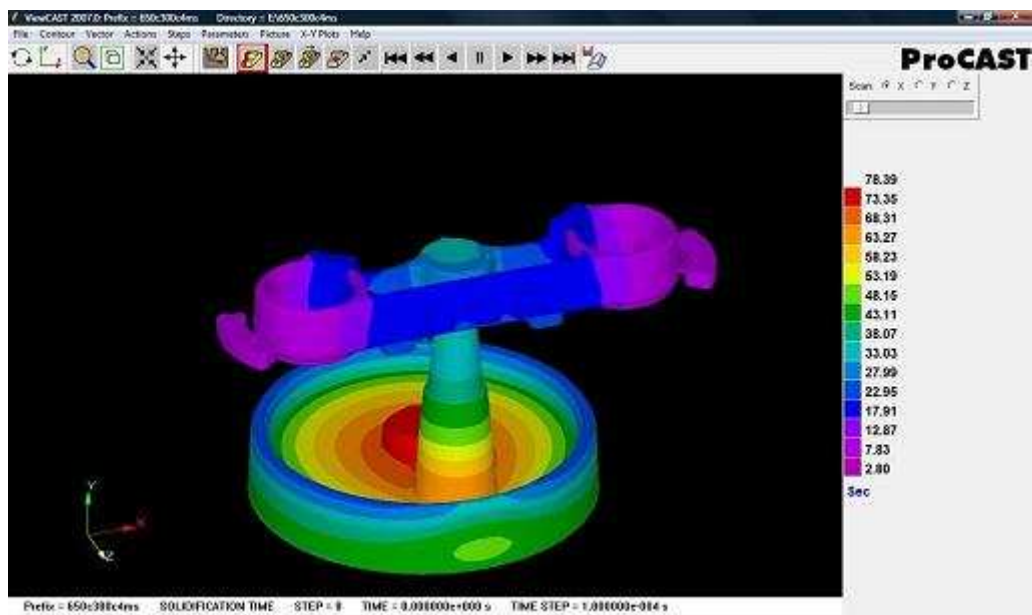


Figura 8.52 Mapa del tiempo de solidificación.

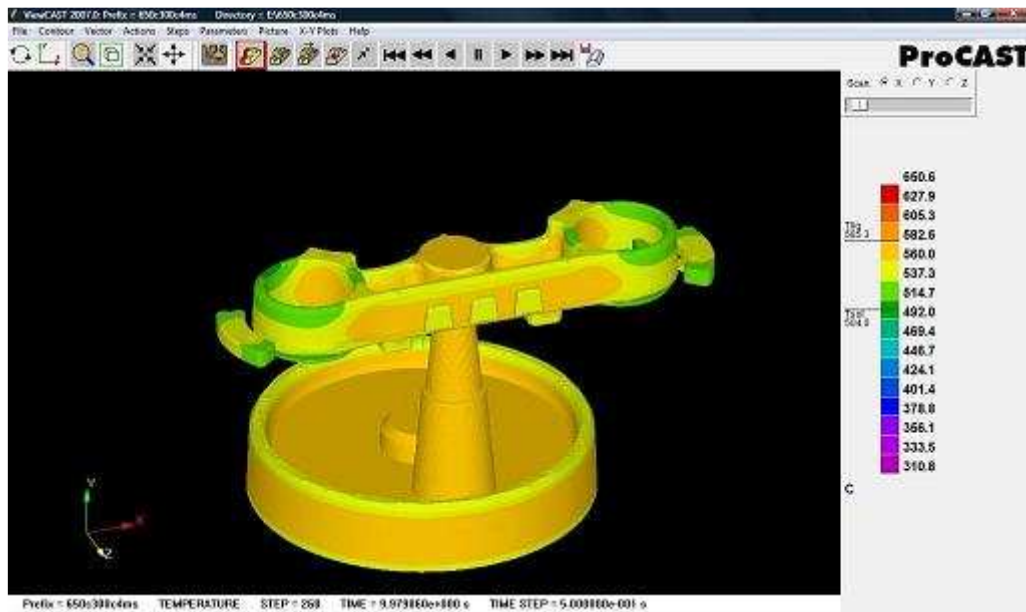


Figura 8.53 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

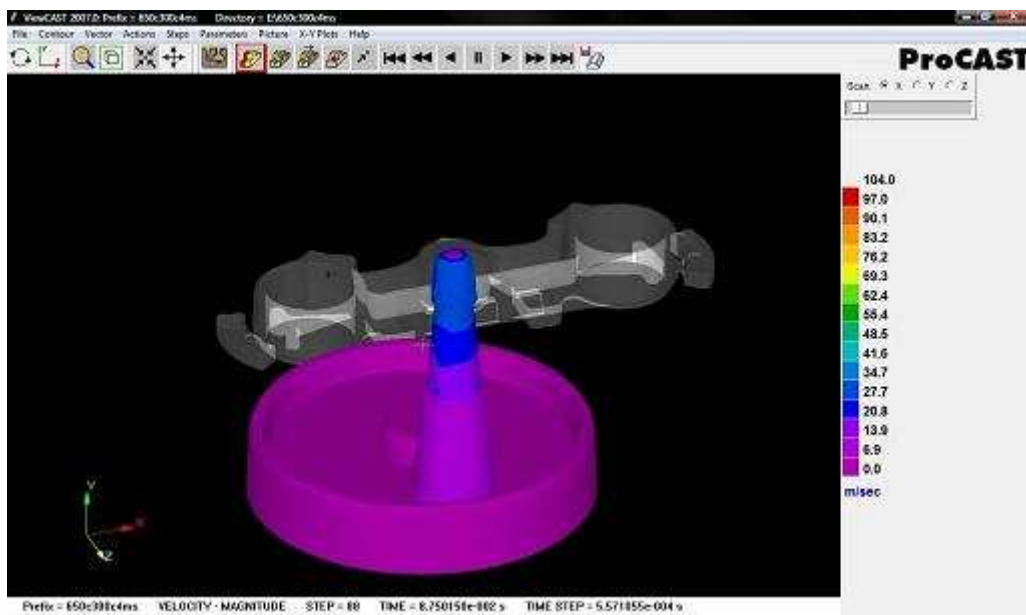


Figura 8.54 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

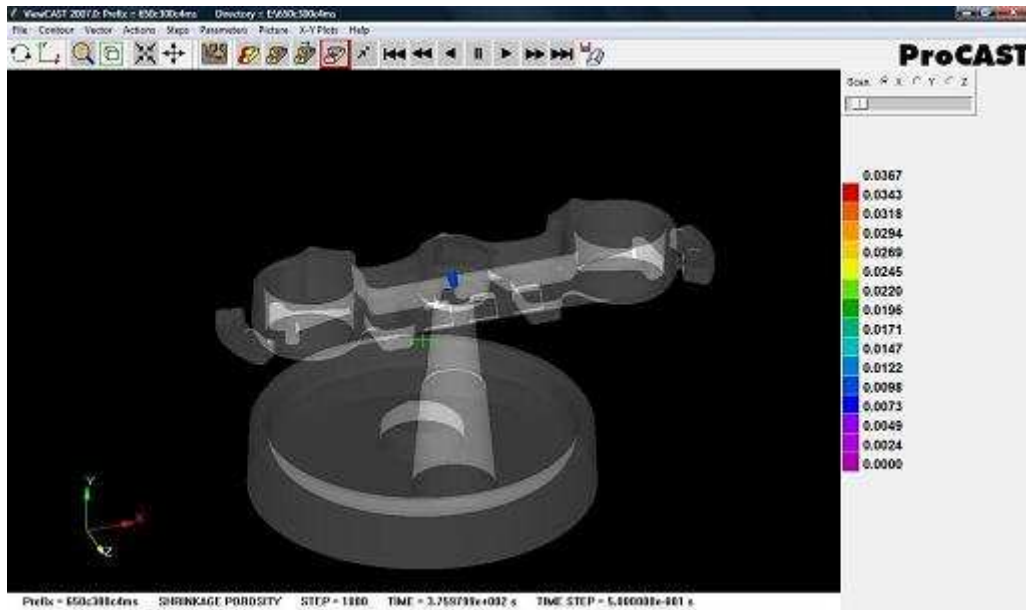


Figura 8.55 Mapa de la porosidad.

8.1.2.12. Simulación 12

Los resultados de esta simulación, para los parámetros de entrada, 650°C de temperatura de colada, 300°C de temperatura de molde y $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad de inyección, son los que se muestran en las siguientes figuras:

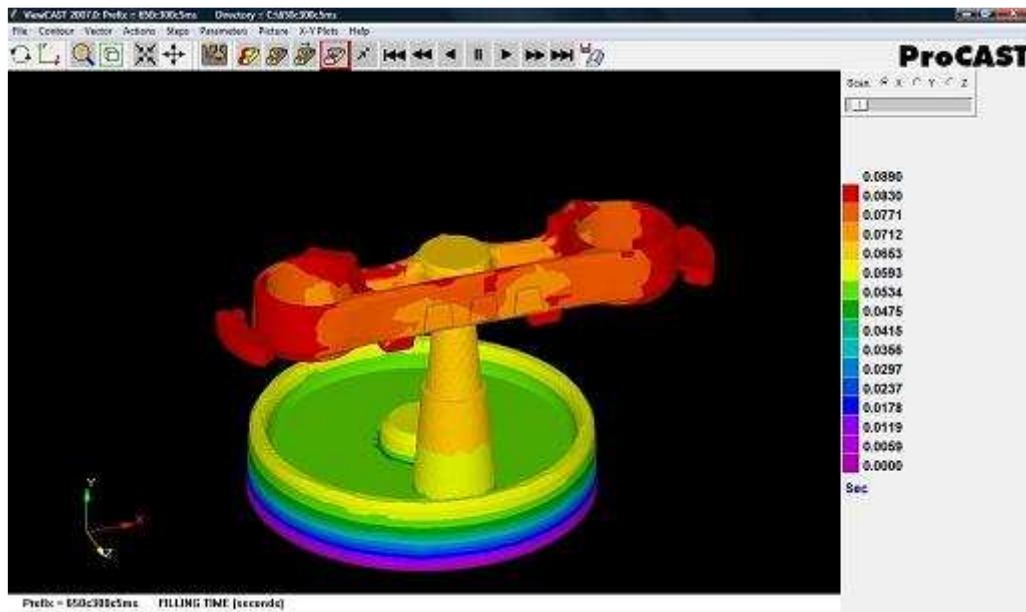


Figura 8.56 Mapa del tiempo de llenado.

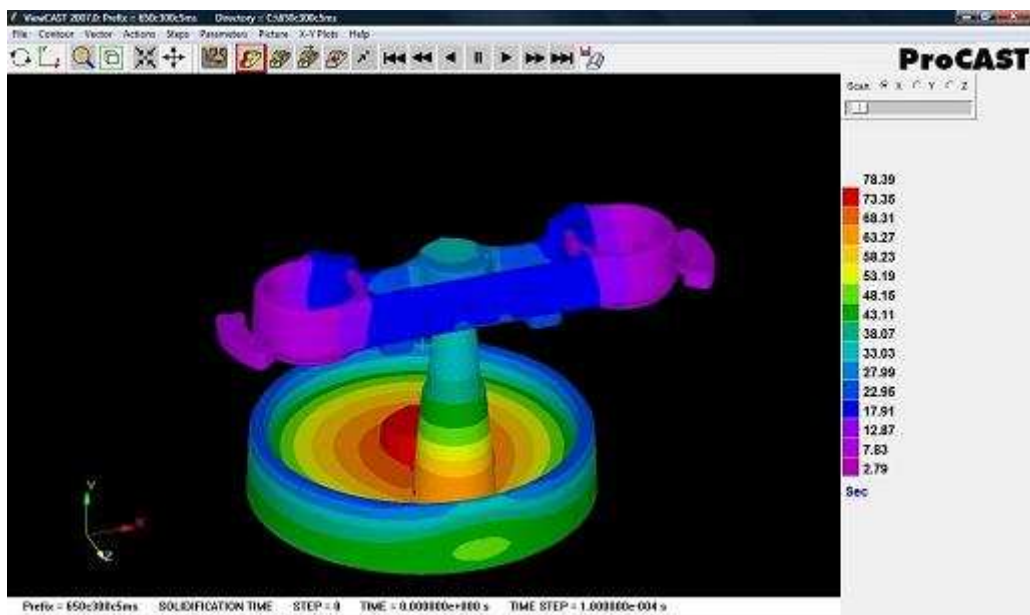


Figura 8.57 Mapa del tiempo de solidificación.

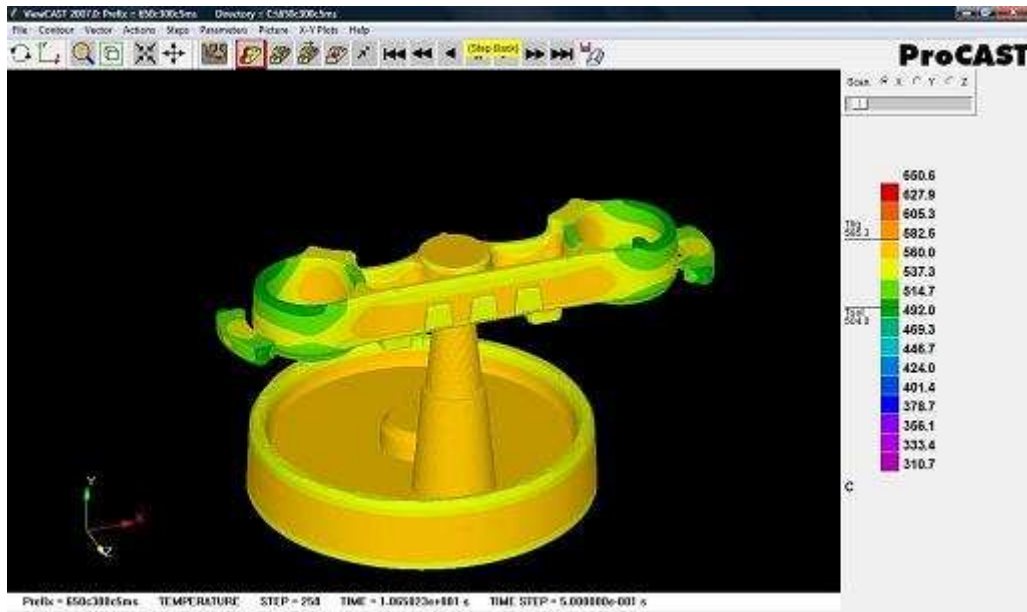


Figura 8.58 Mapa de la temperatura 10 segundos después del llenado.

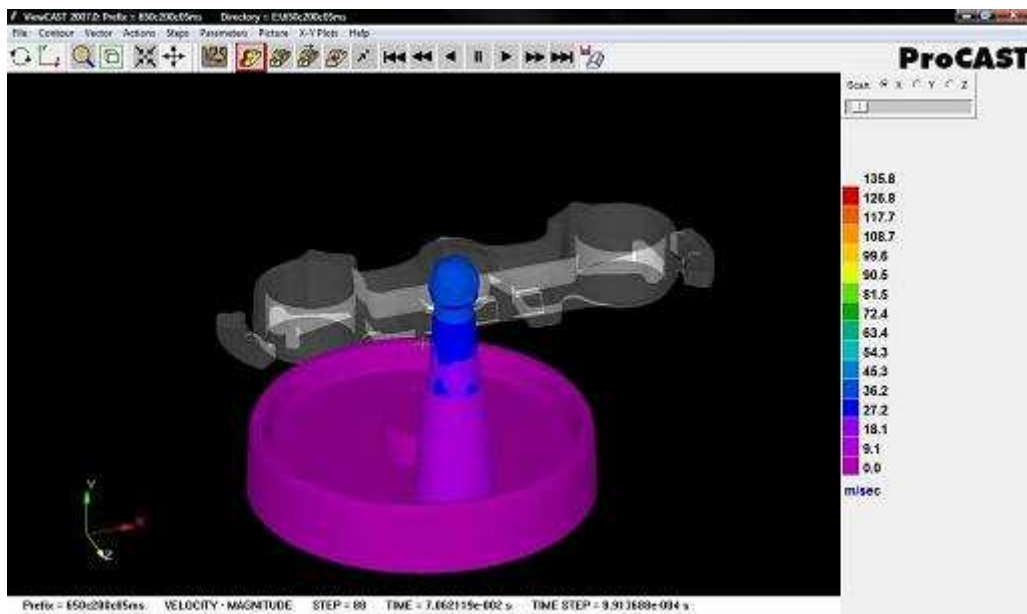


Figura 8.59 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

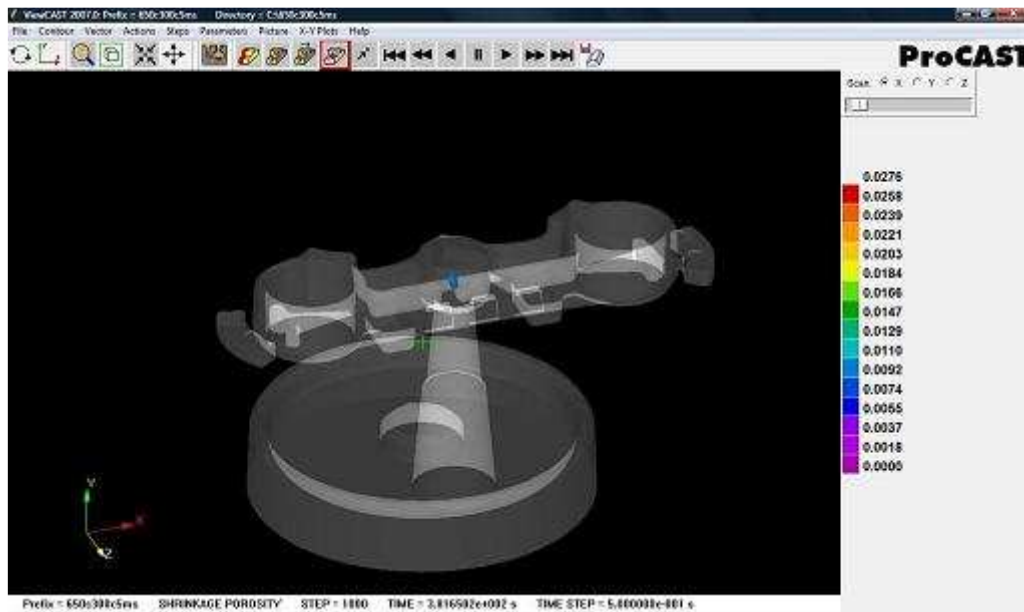


Figura 8.60 Mapa de la porosidad.

8.1.3. Discusión de resultados

Con el objeto de determinar los parámetros con que se obtiene la simulación óptima, se analizan y estudian los parámetros calculados con el programa ProCAST. Los parámetros analizados se exponen en las tablas 8.13 y 8.14.

Tabla 8.13 Resultados de porosidad y fracción sólida.

Simulación	T molde [°C]	v [m·s ⁻¹]	Porosidad	Frac. sólida
1	200	0,2	0,0840	No
2	200	0,3	0,0710	No
3	200	0,4	0,0840	No
4	200	0,5	0,0680	No
5	250	0,2	0,0354	No
6	250	0,3	0,0447	No
7	250	0,4	0,0354	No
8	250	0,5	0,0466	No
9	300	0,2	0,0088	No
10	300	0,3	0,0092	No
11	300	0,4	0,0098	No
12	300	0,5	0,0092	No

Tabla 8.14 Resultados del tiempo de llenado y de solidificación.

Simulación	T molde [°C]	v [m·s ⁻¹]	Llenado [s]	Solidificación [s]
1	200	0,2	0,2232	53,73
2	200	0,3	0,1491	53,68
3	200	0,4	0,1112	53,65
4	200	0,5	0,0891	53,65
5	250	0,2	0,2229	63,82
6	250	0,3	0,0148	63,66
7	250	0,4	0,1112	63,69
8	250	0,5	0,0891	63,7
9	300	0,2	0,2230	78,48
10	300	0,3	0,1486	78,44
11	300	0,4	0,1114	78,39
12	300	0,5	0,0890	78,39

Del análisis de los resultados de la tabla 8.1 se observa que no aparece porosidad hasta que se alcanza el valor 0,084 en tanto por 1, que es el valor máximo que hay de referencia, a partir del cual se considera que hay porosidad en la inyección. Puesto que para valores por debajo de este valor la porosidad es prácticamente despreciable, se considera muy poco influenciable en el comportamiento de la pieza. De acuerdo con los criterios establecidos de porosidad, se podría decir que todas las simulaciones son óptimas.

También se observa que no aparece fracción sólida durante el llenado de la cavidad del molde en ninguna de las simulaciones. Si se hubiera observado algún indicio de aparición de fracción sólida durante el llenado, esta haría descartar automáticamente la simulación. La aparición de fracción sólida durante el llenado, provocaría la formación de una pieza defectuosa y por lo tanto inservible.

Otro de los parámetros importantes que hay que tener en cuenta a la hora de elegir los parámetros idóneos, es el tiempo. En este caso se ha calculado el tiempo de llenado para todos los procesos, y el tiempo de solidificación una vez la inyección de la aleación ha terminado.

Del análisis de resultados de la tabla 8.2 se extrae que los tiempos de llenado varían muy poco, es más, al repetirse la velocidad periódicamente en las diferentes simulaciones, los tiempos se mantienen prácticamente iguales. En cambio al observar

los tiempos de solidificación, se observa una variación importante sobre todo al variar la temperatura del molde.

Se han considerado óptimas las simulaciones que obtienen menores tiempos totales, es decir la suma del tiempo de llenado más el de solidificación, sin utilizar temperaturas superiores a 250°C, debido al incremento de gasto energético que esto supone, haciendo el proceso más costoso. Por este motivo se descartan las simulaciones con una temperatura de molde de 300°C. Tampoco se puede utilizar temperaturas de molde muy bajas porque al inyectar el aluminio se corre el riesgo generar fatiga térmica, con lo cual también se descartan las simulaciones con una temperatura de molde de 200°C.

Una vez analizados todos los datos, se concluye que las simulaciones óptimas son las que se obtienen con una temperatura de molde de 250°C. Estas simulaciones: 1- no muestran apenas porosidad, estando localizada en una zona que se mecaniza posteriormente, 2- no se forma fracción sólida durante el llenado, 3- tienen unos tiempos totales medios y 4- tienen una temperatura molde media que garantiza la inyección de piezas sanas. De entre todas ellas se ha seleccionado la simulación con velocidad de inyección más elevada 0,5 m·s⁻¹ que proporciona una mayor productividad y corresponde a las condiciones de contorno de la simulación número 8.

8.2. Simulación con Vulcan

En este apartado se realiza la simulación con Vulcan, una vez averiguadas las condiciones óptimas de inyección.

8.2.1. Parámetros de entrada

Las tablas 8.15 a 8.18 muestran los parámetros que se han empleado para realizar la simulación con Vulcan.

Tabla 8.15 Condiciones de contorno Simulación 1.

Simulación 1	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	250°C
Velocidad de inyección	0,2 m·s ⁻¹

Tabla 8.16 Condiciones de contorno Simulación 2.

Simulación 2	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	250°C
Velocidad de inyección	0,3 m·s ⁻¹

Tabla 8.17 Condiciones de contorno Simulación 3.

Simulación 3	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	250°C
Velocidad de inyección	0,4 m·s ⁻¹

Tabla 8.18 Condiciones de contorno Simulación 4.

Simulación 4	
Temperatura de entrada del aluminio	650°C
Temperatura de molde	250°C
Velocidad de inyección	0,5 m·s ⁻¹

8.2.2. Simulación

En este apartado se muestran diferentes imágenes del proceso de inyección de la pletina, extraídas de Vulcan.



Figura 8.61 Imagen de llenado del molde al 65%.



Figura 8.62 Imagen de llenado del molde al 90%.



Figura 8.63 Imagen de llenado del molde al 100%.



Figura 8.64 Mapa de la temperatura al finalizar la inyección.



Figura 8.65 Mapa de la velocidad en la entrada de la pieza.

9. Análisis comparativo entre ProCAST y Vulcan

Con los valores óptimos de conformación obtenidos de las simulaciones con ProCAST, se procede a analizar y comparar los resultados obtenidos con Vulcan, con el fin de averiguar que margen de discrepancia hay entre parámetros iguales calculados por distintos programas.

Para realizar el análisis con cada una de las simulaciones, se han escogido dos nodos localizados en diferentes localizaciones de la pieza, y se ha estudiado su comportamiento en dos fases diferentes del proceso, una mientras se produce la inyección y la segunda 40 segundos después de que esta haya finalizado.



Figura 9.1 Localización de los nodos que serán analizados.

Se han realizado un total de 4 análisis, correspondientes cada uno de ellos a las 4 simulaciones óptimas, calculadas con ProCAST y Vulcan.

9.1. Análisis 1

Los parámetros que le corresponden al análisis 1 son: temperatura de colada 650°C, temperatura de molde 250°C y velocidad de inyección 0,2 m·s⁻¹

Las tablas 9.1 y 9.2 muestran los resultados de los nodos calculados con ProCAST y Vulcan, obtenidos mientras se realiza la inyección.

Primer nodo:

Tabla 9.1 Resultados del primer nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Tiempo de llenado	0,2229 s	0,1299 s
Presión	0,4 N/m ²	1,7e+07 N/m ²
Velocidad	0,2 m·s ⁻¹	0,7 m·s ⁻¹
Temperatura	650°C	648°C

Segundo nodo:

Tabla 9.2 Resultados del segundo nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Tiempo de llenado	0,2229 s	0,1299 s
Presión	1,3e+05 N/m ²	3,3e+07 N/m ²
Velocidad	1,66 m·s ⁻¹	1,6 m·s ⁻¹
Temperatura	649°C	650°C

Una vez expuestos los resultados de los nodos obtenidos mientras se realiza la inyección, en las tablas 9.3 y 9.4 se procede a exponer los obtenidos 40 segundos después de que esta haya finalizado.

En esta segunda fase debido a que la inyección ya ha finalizado, no se obtienen presiones ni velocidades, solo se obtienen como referencia temperaturas.

Primer nodo:

Tabla 9.3 Resultados del primer nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Temperatura	288°C	422°C

Segundo nodo:

Tabla 9.4 Resultados del segundo nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Temperatura	317°C	333°C

9.2. Análisis 2

Los parámetros que le corresponden al análisis 2 son: temperatura de colada 650°C, temperatura de molde 250°C y velocidad de inyección $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Las tablas 9.5 y 9.6 muestran los resultados de los nodos calculados con ProCAST y Vulcan, obtenidos mientras se realiza la inyección.

Primer nodo:

Tabla 9.5 Resultados del primer nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Tiempo de llenado	0,1489 s	0,0866 s
Presión	0,4 N/m ²	4,4e+07 N/m ²
Velocidad	0,3 m·s ⁻¹	0,7 m·s ⁻¹
Temperatura	650°C	650°C

Segundo nodo:

Tabla 9.6 Resultados del segundo nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Tiempo de llenado	0,2229 s	0,1299 s
Presión	4,2e+05 N/m ²	4,4e+07 N/m ²
Velocidad	6,4 m·s ⁻¹	3,8 m·s ⁻¹
Temperatura	649°C	649°C

Una vez expuestos los resultados de los nodos obtenidos mientras se realiza la inyección, en las tablas 9.7 y 9.8 se procede a exponer los obtenidos 40 segundos después de que esta haya finalizado.

Primer nodo:

Tabla 9.7 Resultados del primer nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Temperatura	287°C	390°C

Segundo nodo:

Tabla 9.8 Resultados del segundo nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Temperatura	315,5°C	320°C

9.3. Análisis 3

Los parámetros que le corresponden al análisis 3 son: temperatura de colada 650°C, temperatura de molde 250°C y velocidad de inyección $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Las tablas 9.9 y 9.10 muestran los resultados de los nodos calculados con ProCAST y Vulcan, obtenidos mientras se realiza la inyección.

Primer nodo:

Tabla 9.9 Resultados del primer nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Tiempo de llenado	0,1112 s	0,0649 s
Presión	0,5 N/m ²	6,2e+07 N/m ²
Velocidad	0,3 m·s ⁻¹	0,7 m·s ⁻¹
Temperatura	648,5°C	650°C

Segundo nodo:

Tabla 9.10 Resultados del segundo nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Tiempo de llenado	0,2229 s	0,1299 s
Presión	1e+06 N/m ²	6,4e+07 N/m ²
Velocidad	21,5 m·s ⁻¹	13,3 m·s ⁻¹
Temperatura	649,5°C	650°C

Una vez expuestos los resultados de los nodos obtenidos mientras se realiza la inyección, en las tablas 9.11 y 9.12 se procede a exponer los obtenidos 40 segundos después de que esta haya finalizado.

Primer nodo:

Tabla 9.11 Resultados del primer nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Temperatura	287°C	370°C

Segundo nodo:

Tabla 9.12 Resultados del segundo nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Temperatura	315°C	320°C

9.4. Análisis 4

Los parámetros que le corresponden al análisis 4 son: temperatura de colada 650°C, temperatura de molde 250°C y velocidad de inyección $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Las tablas 9.13 y 9.14 muestran los resultados de los nodos calculados con ProCAST y Vulcan, obtenidos mientras se realiza la inyección.

Primer nodo:

Tabla 9.13 Resultados del primer nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Tiempo de llenado	0,0891 s	0,0519 s
Presión	6,08e+07 N/m ²	3e+07 N/m ²
Velocidad	0,5 m·s ⁻¹	1,6 m·s ⁻¹
Temperatura	649°C	649°C

Segundo nodo:

Tabla 9.14 Resultados del segundo nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Tiempo de llenado	0,0891 s	0,0519 s
Presión	8,6e+07 N/m ²	2e+07 N/m ²
Velocidad	25,6 m·s ⁻¹	16 m·s ⁻¹
Temperatura	649°C	649°C

Una vez expuestos los resultados de los nodos obtenidos mientras se realiza la inyección, en las tablas 9.15 y 9.16 se procede a exponer los obtenidos 40 segundos después de que esta haya finalizado.

Primer nodo:

Tabla 9.15 Resultados del primer nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Temperatura	287,5°C	370°C

Segundo nodo:

Tabla 9.16 Resultados del segundo nodo.

Parámetro	ProCAST	Vulcan
Temperatura	318°C	320°C

9.5. Discusión de resultados

Para el análisis 1, los parámetros de presión y velocidad obtenidos con el primer nodo al producirse la inyección, no coinciden. El único parámetro que coincide es la temperatura de 650°C.

Para el análisis 1, el parámetro de presión, obtenido con el segundo nodo al producirse la inyección, no coincide. Los parámetros que coinciden son la velocidad de $1,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y la temperatura de 650°C.

Para el análisis 1, el parámetro de temperatura obtenido con el primer nodo 40 segundos después de producirse la inyección, no coincide. El único parámetro que coincide es la temperatura de 320°C obtenida con el segundo nodo.

Para el análisis 2, los parámetros de presión y velocidad obtenidos con el primer y segundo nodo al producirse la inyección, no coinciden. El único parámetro que coincide es la temperatura de 650°C obtenida con ambos nodos.

Para el análisis 2, el parámetro de temperatura obtenido con el primer nodo 40 segundos después de producirse la inyección, no coincide. El único parámetro que coincide es la temperatura de 317°C obtenida con el segundo nodo.

Para el análisis 3, los parámetros de presión y velocidad obtenidos con el primer y segundo nodo al producirse la inyección, no coinciden. El único parámetro que coincide es la temperatura de 650°C obtenida con ambos nodos.

Para el análisis 3, el parámetro de temperatura obtenido con el primer nodo 40 segundos después de producirse la inyección, no coincide. El único parámetro que coincide es la temperatura de 317°C obtenida con el segundo nodo.

Para el análisis 4, los parámetros de presión y velocidad obtenidos con el primer y segundo nodo al producirse la inyección, no coinciden. El único parámetro que coincide es la temperatura de 650°C obtenida con ambos nodos.

Para el análisis 4, el parámetro de temperatura obtenido con el primer nodo 40 segundos después de producirse la inyección, no coincide. El único parámetro que coincide es la temperatura de 318°C obtenida con el segundo nodo.

10. Conclusiones

Los programas ProCAST y Vulcan, han permitido simular correctamente todo el proceso de inyección.

Los parámetros correspondientes a la simulación óptima, son los que se producen con una temperatura de colada de 650°C, con una temperatura de molde de 250°C y con una velocidad de inyección de 0,5 m·s⁻¹.

Las temperaturas de molde más altas son las que permiten obtener tiempos de llenado más cortos y proporcionan un tamaño menor de la porosidad siendo el valor de ésta inferior al 1 %, pero requieren un mayor aporte energético y por lo tanto son más costosas.

Se detecta porosidad de contracción para todos los componentes pero es inapreciable, con valores por debajo de 8,40 % en las zonas más masivas del componente tanto con ProCAST como con Vulcan.

Para una misma simulación realizada con ambos programas, los tiempos de llenado no coinciden.

Para el análisis comparativo 1 sólo son coincidentes los valores de temperatura para los nodos 1 y 2 para ambos programas tanto en la primera medida como a los 40 segundos, siendo diferentes los valores observados para el resto de parámetros.

Para el análisis comparativo 2 sólo son coincidentes los valores de temperatura para los nodos 1 y 2 para ambos programas tanto en la primera medida como a los 40 segundos, siendo diferentes los valores observados para el resto de parámetros.

Para el análisis comparativo 3 sólo son coincidentes los valores de temperatura para los nodos 1 y 2 para ambos programas tanto en la primera medida como a los 40 segundos, siendo diferentes los valores observados para el resto de parámetros.

Para el análisis comparativo 4 sólo son coincidentes los valores de temperatura para los nodos 1 y 2 para ambos programas tanto en la primera medida como a los 40 segundos, siendo diferentes los valores observados para el resto de parámetros.

Aunque ambos programas han permitido simular correctamente todo el proceso, parámetros iguales calculados por distintos programas, no coinciden.

Las diferencias observadas entre los resultados obtenidos por ProCAST y Vulcan son debidas a un problema en la malla obtenida por el programa Vulcan. Causa verificada por los técnicos del programa.

11. Presupuesto

A continuación se muestra el presupuesto del proyecto.

Orden	Concepto	Número de ensayos	Trabajo de usuario [h]	Trabajo de usuario [€/h]	Tarea total de usuario [€]
1	Reparación de la geometría y del mallado con ProCAST	1	65	35	2.275
2	Reparación de la geometría y del mallado con Vulcan	1	65	35	2.275
3	Aplicación de las condiciones de contorno y lanzamiento de las simulaciones con ProCAST y Vulcan	16	5	35	2.800
4	Redacción de la memoria	1	90	35	3.150
	Sub-Total				10.500
	IVA 16%				1.680
	Suma Total de Usuario				12.180

Orden	Concepto	Número de ensayos	Trabajo de máquina [h]	Trabajo de máquina [€/h]	Tarea total de máquina [€]
1	Reparación de la geometría y del mallado con ProCAST	1	65	75	4.875
2	Reparación de la geometría y del mallado con Vulcan	1	65	75	4.875
3	Aplicación de las condiciones de contorno y lanzamiento de las simulaciones, de la 1 a la 16	16	5	75	6.000
4	Cálculo (16 simulaciones)	16	24	75	28.800
5	Redacción de la memoria	1	90	5	450
	Sub-Total				45.000
	IVA 16%				7.200
	Suma Total de Máquina				52.200

12. Bibliografía

- [1] Andrés Biedermann. *Fundición a presión*. Primera edición de José Monteso. (1952). [pags.13-18, 177-178].
- [2] URL<<http://www.dynacast.com>> [Consulta enero 2008]
- [3] Pedro Coca Rebollero y Juan Rosique Jiménez. *Tecnología mecánica y metrotecnia*. Ediciones Pirámide. (2002). [pags.179-182, 249-258].
- [4] José Maria Lasheras. *Tecnología mecánica y metrotecnia*. Editorial Donostiarra. (2000). [pags.134-145].
- [5] URL<<http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/QU00901M.pdf>> [Consulta enero 2008]
- [6] URL<<http://enciclopedia.us.es/index.php/Aluminio>> [Consulta febrero 2008]
- [7] URL<http://www.salonhogar.com/ciencias/fisica/aluminio/aleantes_clasificacion.htm> [Consulta febrero 2008]
- [8] URL<http://www.funial.com/es/funial_alumini.html> [Consulta marzo 2008]
- [9] Artículo sobre la aleación L-2630 de la base de datos del departamento de ciencia de los materiales y ingeniería metalúrgica de la E.P.S.E.V.G.
- [10] URL<<http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20H13.pdf>> [Consulta febrero 2008]
- [11] Archivo de la base de datos del departamento de mecánica de la escuela IES Estebe Tarradas (Barcelona), proporcionado por el profesor Ángel Carazo.
- [12] Publicación docente UPC. Fluido mecánica 1. Tema 3. Principios básicos del flujo. Profesora, Montse Carbonell Ventura.
- [13] URL<http://aerotrastornados.blogspot.com/2007_01_01_archive.html>
- [14] URL<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/57/Velocidad_en_mov_laminar.jpeg/200px-Velocidad_en_mov_laminar.jpeg>
- [15] URL<http://formación.flysharing.com/file.php/2/Imagenes/Fig_181.gif>
- [16] URL<<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/reynolds/numero.html>> [Consulta febrero 2008]
- [17] URL<http://www.camingenieria.com/defectos_inyeccion.html> [Consulta febrero 2008]

- [18] Juan Sisquela Argila. *Defectos de fundición*. American Foundrymen's association (A.F.A). Editorial Aguilar. (1959). [pags.3, 36]
- [19] URL<http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/dibujo-asistido-ordenador.html?x=20070822klpingtcn_169.Kes> [Consulta abril 2008]
- [20] URL<<http://www.astroscu.unam.mx/~farah/FEA/Curso%20FI%20de%20FEA/Tarea%202/tarea2FEA.doc>> [Consulta marzo 2008]
- [21] URL<http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1214104-114808/06EfV06de23.pdf> [Consulta abril 2008]
- [22] URL<<http://www.consultorescpm.com.mx/Productos/Software/PRO-CAST/procast.htm>> [Consulta marzo 2008]
- [23] Manual de ayuda a ProCAST 2008
- [24] URL<<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/ResenyaProducto.asp?R=7969>> [Consulta marzo 2008]
- [25] URL<<http://grupos.unican.es/gidai/asignaturas/CI/Aluminio.pdf>> [Consulta marzo 2008]
- [26] URL<<http://www.ciencia.cl/CienciaAlDia/volumen5/numero2/articulos/articulo2.html>> [Consulta marzo 2008]

13. Anexos

Los dvds que se incluyen con el proyecto contienen las simulaciones realizadas con ProCAST y Vulcan.